



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für mobile
Maschinen und Nutzfahrzeuge



Forschungsberichte

Ulla Marggraf

Ermittlung der Prozessqualität bei der Vermischung der Wirkstoffe in Pflanzenschutzspritzen

Herausgeber:
Freundes- und Förderkreis des Instituts
für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge e.V.

Shaker Verlag

Ermittlung der Prozessqualität bei der Vermischung der Wirkstoffe in Pflanzenschutzspritzen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde einer
Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Ulla Marggraf
geboren in: Mönchengladbach

eingereicht am: 16.05.2019
mündliche Prüfung am: 24.07.2019

Gutachter: Prof. Dr. Ludger Frerichs
Prof. Dr.-Ing. Henning Jürgen Meyer
Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor

2019

Forschungsberichte aus dem
Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge

Ulla Marggraf

**Ermittlung der Prozessqualität bei der Vermischung
der Wirkstoffe in Pflanzenschutzspritzen**

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6915-0

ISSN 2196-7369

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Besonders danken möchte ich Herrn Prof. Dr. Ludger Frerichs als Leiter des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig für die vielseitigen Einblicke, die ich als wissenschaftliche Mitarbeiterin erhalten habe und durch die ich meinen Horizont stetig erweitern und meine eigenverantwortliche Arbeitsweise weiter schulen konnte. Während der Bearbeitung meines Forschungsprojektes finanziert von den Amazonen-Werken habe ich die Möglichkeiten und den Freiraum erhalten intensiv in die Forschung zu möglichen Prüfmethode für die Pflanzenschutztechnik einzusteigen. Für die fachliche und persönliche Unterstützung als mein Doktorvater danke ich Herrn Prof. Frerichs ebenfalls herzlich. Das entgegengebrachte Vertrauen und die enge Zusammenarbeit haben wesentlich zum Gelingen der Promotion beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Henning Jürgen Meyer, Leiter des Fachgebietes Konstruktion von Maschinensystemen der Technischen Universität Berlin, möchte ich für das Koreferat meiner Arbeit und die Begeisterung bezüglich meines Forschungsthemas danken. Für den Vorsitz der Prüfungskommission bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor, Leiter des Institutes für Konstruktionstechnik der Technischen Universität Braunschweig.

Weiterhin gilt mein persönlicher Dank den Mitarbeitern der Amazonen-Werken und insbesondere Herrn Volker Ehlen für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und den Austausch zur Praxis und Technik des Pflanzenschutzes.

Den Kolleginnen und Kollegen, die mich während meiner Institutszeit begleitet und für fachliche und persönliche Diskussionen immer zur Verfügung gestanden haben, danke ich. Besonderer Dank gilt hier Herrn Ralf Titz, Herrn Thees Vollmer und Herrn Lukas Poppa für ihre Bereitschaft sich in meine Themen ein zudenken und mich durch Anregungen immer wieder weiter zu bringen. Die kollegiale Unterstützung in allen Lebenslagen wird mir immer in positiver Erinnerung bleiben.

Mein herzlichster Dank gilt meinem Mann Ole Marggraf, der selbst mitten in der Promotion, immer bereit war mich zu unterstützen und zu motivieren, sodass ich die Zeit und Konzentration für diese Arbeit aufbringen konnte. Unseren beiden Kindern danke ich für die vielen liebevollen Momente und die Ablenkung durch die kindlichen Themen, die meine fachliche Denkfähigkeit gestärkt haben. Auch meinen Eltern danke ich für ihre ganzheitliche Unterstützung, insbesondere meiner Mutter Heike Grünert, für den Glauben an meine Fähigkeiten, der mich in meinen unterschiedlichen Lebensphasen immer wieder vorwärts gebracht hat.

Braunschweig, im Juli 2019

Ulla Marggraf

Kurzfassung

Direkteinspeisungssysteme ermöglichen einen gezielten Einsatz von Pflanzenschutzmitteln. Sie bringen möglichst düsennah die benötigte Menge an Pflanzenschutzmittel in den Wasserstrom ein, um die Brühe anschließend bedarfsgerecht zu applizieren. Sie produzieren dabei fast keine Restmengen in der Pflanzenschutzspritze, die aufwendig entsorgt werden müssen, und bieten dadurch die Chance, Verfahrensweisen im Pflanzenschutz mit reduziertem Pflanzenschutzmittelbedarf zu unterstützen. Bisher konnten sich Direkteinspeisungssysteme jedoch nicht in der Landwirtschaft etablieren, da Anforderungen aus der Praxis, beispielsweise die erforderlichen unterschiedlichen Aufwandmengen und die variantenreichen Eigenschaften der verschiedenen Pflanzenschutzmittel, durch die Systeme nur eingeschränkt abgedeckt werden. Um die Entwicklung von praxistauglichen Direkteinspeisungssystemen zu unterstützen, wird eine effektive und einfache Prüfmethode benötigt, welche die Schwächen und Stärken eines entwickelten Systems schon in den frühen Phasen bei der Prüfung variantenreicher Funktionsmuster aufzeigt.

In dieser Arbeit wird eine Methode entwickelt und untersucht, die diese Unterstützung im Entwicklungsprozess von Pflanzenschutztechnik ermöglicht. Die echtzeitfähige Prüfmethode (EPM) nutzt dazu Aspekte von Verfahrensweisen der automatischen Sichtprüfung für die Qualitätsprüfung. Zur Anwendung der EPM nimmt eine Prüfeinrichtung ein digitales Bild der zu untersuchenden Flüssigkeit auf, die zuvor mit einem fluoreszierenden Markierungsstoff versehen und für die Aufnahme mit dem anregenden Lichtspektrum des Markierungsstoffes direkt beleuchtet wird. Ein Algorithmus berechnet anhand einer Auswertung der Farbwerte den Mischungszustand der Flüssigkeit. Hierdurch kann eine Aussage über die Prozessqualität des Direkteinspeisungssystems getroffen werden. Durch die schnelle Arbeitsweise in Kombination mit der mobilen Einsatzmöglichkeit verbessert die EPM die Prüfung der Mischqualität von Pflanzenschutzspritzen. Während die derzeitigen Verfahren aufwendige Auswertungen und teure Messgeräte erfordern, kann die EPM durch eine einfache Prüfeinrichtung angewendet werden und liefert das Messergebnis direkt. Der ausgewählte gesundheitlich unbedenkliche Versuchsstoff ermöglicht der EPM, Direkteinspeisungssysteme ohne reale Pflanzenschutzmittel zu erproben.

Konventionelle Methoden zur Überprüfung der Mischqualität helfen, die Validierung der EPM durchzuführen. Hier werden Versuche durchgeführt, die verschiedene Mischqualitäten zwischen Pflanzenschutzmitteln und Wasser simulieren. Anhand der festgestellten Mischqualität der simulierten Mischungen aus der konventionellen Prüfung werden die Ergebnisse aus der Betrachtung der Versuchsaufnahmen berechnet. Eine Berechnungsvorschrift für die EPM wird hergeleitet und mit weiteren konventionell ausgewerteten Versuchen in ihrem Verfahren bestätigt. Durch die vergleichende Fehlerbetrachtung der Methode und eine daraus resultierende Abschätzung der

Methodengenauigkeit, wird die EPM als genauere Prüfmethode gegenüber gängigen Methoden ermittelt. Die EPM vereinfacht die Prüfung von Pflanzenschutzspritzen gegenüber den heute eingesetzten Verfahren. Eine Kostenreduktion und ein vielfältiger Einsatz verschiedener Prüfungen bei Pflanzenschutztechnik sind mit der EPM möglich.

Abstract

Direct injection systems enable the targeted use of plant protection products. They feed the required amount of plant protection product into the water stream as close as possible to the nozzle in order to subsequently apply the spray mixture as required. They produce almost no residues in the field sprayer, which have to be extensively disposed of, and thus offer the opportunity to support methods in crop protection with a reduced need for plant protection products. So far, however, direct injection systems have not been able to establish themselves in agriculture, as practical requirements, e. g. handling of different application quantities and varied properties of the plant protection products, are only covered to a limited extent by the systems. In order to support the development of practical direct feed systems, an effective and simple test method is required which shows the weaknesses and strengths of a developed system already in the early phases of the testing of a wide variety of functional patterns.

In this thesis, a method is developed and investigated that enables this support in the development process of crop protection technology. The real-time test method (EPM) uses aspects of automatic visual inspection procedures as part of quality control. To apply the EPM, a test device takes a digital image of the liquid to be tested, which is previously provided with a fluorescent dye and directly illuminated for the recording with the stimulating light spectrum of the dye. An algorithm calculates the mixing state of the liquid on the basis of an evaluation of the color values. This allows a statement to be made about the process quality of the direct injection system. The EPM improves the testing of the mixing quality of crop protection sprayers due to the fast working method in combination with the mobile application possibility. While the current methods require complex evaluations and expensive measuring instruments, the EPM can be applied by a simple testing device and delivers the measurement result directly. The selected test materials, which is harmless to health, enables EPM to test direct injection systems without using real plant protection products.

Conventional methods for testing the mixing quality help to validate the EPM. Tests are carried out which simulate different mixing qualities between plant protection products and water. Experiments are carried out to simulate different mixing qualities between plant protection products and water. The results of the test recordings are calculated on the basis of the determined mixing quality of the simulated mixtures from the conventional test. A calculation rule for the EPM is derived and confirmed with further conventionally evaluated tests. Through the comparative error analysis of the method and the resulting estimation of the method accuracy, the EPM is determined as a more accurate test method than conventional methods. EPM simplifies the testing of crop protection sprayers compared to the methods used today. The EPM allows a cost reduction and a versatile use of different tests in crop protection technology.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XIII
Abkürzungen und Indizes	XV
1 Einflüsse auf die Entwicklung von Pflanzenschutztechnik	1
2 Stand der Technik im Pflanzenschutz und in anderen relevanten Bereichen.....	5
2.1 Anforderungen an den praktizierten, ackerbaulichen Pflanzenschutz	5
2.1.1 Pflanzenschutztechnik im Ackerbau.....	5
2.1.2 Pflanzenschutzmittel und ihre Zusammensetzungen in der Spritzbrühe	12
2.2 Prozessanalyse und Bewertung von Pflanzenschutzsystemen	16
2.2.1 Entwicklungszyklus am Beispiel Direkteinspeisung	16
2.2.2 Prüfungen des Flüssigkeitssystems von Pflanzenschutzspritzen.....	18
2.2.3 Grundlagen und Anwendung ausgewählter Messmethoden.....	21
3 Die echtzeitfähige Prüfmethode und ihre Zielsetzung.....	31
4 Untersuchung der Mischqualität in Versuch und Auswertung.....	35
4.1 Eingesetzte Prüfstoffe	35
4.2 Versuche zur optischen Qualitätserfassung.....	39
4.2.1 Übertragung anderer Prüfanordnungen auf den Versuchsaufbau	39
4.2.2 Versuchsaufbau der Methode zur optischen Qualitätsuntersuchung	41
4.2.3 Durchführung von Versuchen mit unterschiedlicher Mischqualität.....	42
4.3 Methoden zur Analyse und Bewertung der Mischqualität.....	44
5 Drei Prüfmethoden im Daten- und Ergebnisvergleich	55
6 Plausibilität der echtzeitfähigen Prüfmethode	65
6.1 Fehlerbetrachtung der Versuchs- und Auswertungsdurchführung.....	65
6.2 Genauigkeitsabschätzung der Prüfmethoden	74
6.3 Mögliche Prüfeinrichtung	81
6.3.1 Mobiles Endgerät.....	81
6.3.2 Funktionserweiterungen der EPM	82
6.3.3 Ausblick über die nächsten Schritte zur Erweiterung der EPM	85
7 Zusammenfassung.....	87

8	Literaturverzeichnis.....	89
Anhang		93

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Größe
a		untere Grenze
AWM	l/ha	Aufwandmenge, flüssig
AWM	kg/ha	Aufwandmenge, fest
B	-	Breite des Blauanteils im RGB-Farbwertehistogramm
b		obere Grenze
bl	-	Blauanteil des RGB-Farbwertes
b _{max}	-	maximale mögliche Breite des Histogramms
b _{min}	-	minimale mögliche Breite des Histogramms
b _{opt}	-	standardisierte Breite des Histogramms bei einer optimalen Durchmischung im Versuch ($\hat{=}$ Erwartungswert der Histogrammbreite)
FW	-	Farbwert
FW _{kor}	-	korrigierter Farbwert
G	-	Breite des Grünanteils im RGB-Farbwertehistogramm
gr	-	Grünanteil des RGB-Farbwertes
gw	-	Grauwert
GW	-	Grenzwert für eine gute Mischqualität
k	-	empirisch ermittelter Faktor
K		Korrektion
n	-	Anzahl der Messungen
P	ppm	zulässige Abweichung in [parts per million - (10^{-6})]
p	-	Prozentsatz der Abweichung der Mischqualität im positiven wie negativen Bereich
R	-	Breite des Rotanteils im RGB-Farbwertehistogramm

Zeichen	Einheit	Größe
r_o	-	Rotanteil des RGB-Farbwertes
s		empirische Standardabweichung
u		Unsicherheit der Messwerte oder Schätzwerte
u_1		Unsicherheit der ersten zufälligen Abweichung
u_2		Unsicherheit der zweiten zufälligen Abweichung
u_{ges}		gesamte Unsicherheit
\bar{v}		arithmetischer Mittelwert
v_j		Messwert einer Messung ($j = 1, \dots, n$)
x_2		Schätzwert
Δg		Differenz der Grenzen
η	mPa·s	dynamische Viskosität
λ	nm	Wellenlänge
μ	-	Erwartungswert (z.B. der Breite des Histogramms bei einer idealen Durchmischung)
Π	-	Qualitätskriterium der EPM
Π_{opt}	-	durchschnittliches Qualitätskriterium der durchmischten Versuche bei den gegebenen Umgebungsbedingungen
σ		Standardabweichung

Abkürzungen und Indizes

Abkürzung Bedeutung

AWM	Aufwandmenge
BS	British Standard
BSF	Brillant-Sulfo-Falvin
CFD	Computational Fluid Dynamics
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage (Int. Beleuchtungskommission)
DES	Direkteinspeisungssystem
DIN	Deutsches Institut für Normung
EPM	echtzeitfähige Prüfmethode
HSV	Farbbeschreibung mit einem Farbraum, der durch den Farbwert (Hue), die Farbsättigung (Saturation) und den Hellwert (Value) aufgespannt wird
ISO	International Standard Organisation
JKI	Julius Kühn-Institut
JPEG	Dateiformat zur Speicherung von Bilddaten (Joint Photographic Experts Group)
LED	Leuchtdioden (light-emitting diodes)
max.	maximal
min.	minimal
PSM	Pflanzenschutzmittel
RAW	Rohdatenformat
RGB	Farbbeschreibung mit einem Farbraum, der durch die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau aufgespannt wird
TIFF	Dateiformat zur Speicherung von Bilddaten (Tagged Image File Format)
UV	Ultraviolette Strahlung
VP	PSM-Vergleichsprodukt

1 Einflüsse auf die Entwicklung von Pflanzenschutztechnik

Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln ist eine der Emissionsformen der landwirtschaftlichen Produktion, die in der Gesellschaft stark umstritten ist. So wurde in den letzten Jahren zunehmend über Verbote und die Wiederzulassungen von Pflanzenschutzmitteln diskutiert. Der Einsatz von gesundheitlich bedenklichen Mitteln wird von der Gesellschaft der Industrienationen kritisiert. Einer Gesellschaft, deren Umweltbewusstsein und Bedarf nach ökologischer Ernährung steigt. Daher steht neben der Belastung des Menschen auch die Belastung der Umwelt im Fokus der Kritik. [Ems17]

Die Pflanzenschutzmaßnahmen einzustellen, ist im Sinne der Ernährungs-, Qualitäts- und Existenzsicherung voraussichtlich keine Lösung. Denn praktiziert werden chemische Pflanzenschutzmaßnahmen, um Ertragsverlusten oder Ernteausfällen vorzubeugen. Bei pilzlichen Schaderregern beispielsweise kann der Ertrag abhängig von der Kultur und Region um 40 % geringer sein. [Bör09]

Dennoch werden Pflanzenschutzmittel als umweltbelastende Stoffe eingestuft, wodurch ihre Applikationen und Aufwandmengen begrenzt werden. Es ist davon auszugehen, dass auch Pflanzenschutzmittelhersteller mit einer niedrigeren Aufwandmenge bei der Zulassung von Produkten reagieren. Die Wirkungsreserven der eingesetzten Pflanzenschutzmittel unterhalb der zugelassenen Dosierungen werden also minimiert. [Ems17]; [Roß16]

Zur guten fachlichen Praxis des Pflanzenschutzes gehört das Resistenzmanagement. Das Ziel ist, Resistenzen der Schaderreger zu vermeiden und damit dem Ausbleiben von Bekämpfungserfolgen vorzubeugen. Maßnahmen sind hier:

- die Wirkstoffe zu wechseln,
- die Zahl der Applikationen zu reduzieren,
- die Dosierungen einzuhalten und damit eine Verringerung der Aufwandmengen zu vermeiden,
- der Anbau resistenter Nutzpflanzen gegenüber den Schaderregern,
- die Optimierung von Fruchtfolgen und
- eine frühzeitige befallsbezogene Anwendung. [Bör09]

Auf die Entwicklungen der guten fachlichen Praxis kann im praktizierten Pflanzenschutz mit verbesserter Technik reagiert werden. Notwendig sind eine genaue Dosierung der Pflanzenschutzmittel, eine präzise Applikation und die Einhaltung von Aufwandmengen mit geringen Konzentrationsschwankungen bei der Applikation. Mit Verwendung entwickelter Sensortechnik, beispielsweise zur Pflanzenerkennung, sowie der Weiterentwicklung von

Pflanzenschutzspritzen kann die geforderte Präzision im Pflanzenschutz bedient werden [Lei13]; [Paw16].

Ob die Pflanzenschutzsysteme die gesetzlichen Vorgaben unter anderem zur Einhaltung der Grenzen bei Konzentrationsschwankungen erfüllen, wird von den Zulassungsstellen für Pflanzenschutzgeräte geprüft. Hier werden Prüfmethode bei einem Prototypen einer Pflanzenschutzspritze angewandt, die aufwendige Laboruntersuchungen und teure Messtechnik erfordern. Doch welche Möglichkeiten gibt es darüber hinaus, den Spritzprozess in seiner Qualität in einer frühzeitigen Entwicklungsphase zu bewerten?

Hier gewinnt die rechnergestützte Simulation als Auslegungswerkzeug in der Entwicklung zunehmend an Bedeutung. Dennoch sind weiterhin der Aufbau von Funktionsmustern und die Überprüfung der Prozessqualität notwendig. Da neben den Prüfverfahren der Zulassungsstellen keine öffentlich geläufigen Prüfmethode zur Qualitätsuntersuchung der Mischprozesse bei Pflanzenschutzspritzen bekannt sind, ist es Ziel dieser Arbeit, eine einfache echtzeitfähige Prüfmethode (kurz EPM) zu entwickeln und diese auf ihre Funktionsfähigkeit hin abzuschätzen.

Als Grundlage für die Entwicklung der echtzeitfähigen Prüfmethode wird im zweiten Kapitel auf Pflanzenschutzgeräte für Ackerbaukulturen eingegangen. Unterschieden wird zwischen konventioneller Technik, wie sie im praktizierten Pflanzenschutz angewendet wird, und den Direkteinspeisungssystemen. Die wesentlichen Anforderungen an den internen Arbeitsprozess der Pflanzenschutzspritzen werden anhand der Eigenschaften der verwendeten Pflanzenschutzmittel dargestellt. Anschließend werden diese Anforderungen aufgegriffen, um die Darstellung des Entwicklungszyklus von Direkteinspeisungssystemen einzuleiten. Praktizierte Methoden zur Erprobung von Pflanzenschutzspritzen, die auch den Entwicklungsprozess dieser unterstützen können, schließen sich an. Als Abschluss des Kapitels werden zusätzliche Methoden anderer Fachbereiche, die ebenfalls sinnvoll für die Anwendung bei Pflanzenschutzspritzen erscheinen, thematisiert.

Aufbauend auf den dargestellten Grundlagen wird im dritten Kapitel die Forschungsthese präzisiert. Der Beweis der These schließt sich in den darauffolgenden Kapiteln dieser Arbeit an und belegt, dass die Nutzung einer Bildverarbeitung als EPM zulässig ist. Beginnend mit der Beschreibung der genutzten Prüfmittel und Methoden in Kapitel vier, werden die Versuche zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der EPM beschrieben.

Die EPM wird anhand von konventionellen Messdaten validiert. Dazu werden die Daten und Versuchsergebnisse in Kapitel fünf aufgezeigt. Eine Ergebnisbewertung auf Basis der durchgeführten Versuche erfolgt in Kapitel sechs. Die ermittelten Messdaten von konventionellen Untersuchungsmethoden der Mischqualität werden mit den Messdaten der EPM vergleichend bewertet. Es folgt eine Genauigkeitsabschätzung einer konventionellen Methode und der EPM zueinander. Als Kapitelabschluss werden die Möglichkeiten einer

Prüfeinrichtung und Hinweise auf erweiterte Nutzungsmöglichkeiten der EPM aufgezeigt. Die Arbeit schließt mit ihrer Zusammenfassung im siebten Kapitel.

2 Stand der Technik im Pflanzenschutz und in anderen relevanten Bereichen

2.1 Anforderungen an den praktizierten, ackerbaulichen Pflanzenschutz

Reduzierte Ernteerträge und Verunreinigungen des Erntegutes entstehen durch verschiedene Schaderreger. Um den Konkurrenzdruck zwischen Nutzpflanze und sogenannten Unkräutern sowie Schäden an der Nutzpflanze durch Insekten oder pilzliche Schaderreger zu minimieren, werden Zielflächen mit verschiedenen chemischen Pflanzenschutzmitteln (PSM) behandelt. Diese hinterlassen oft Rückstände in der Nutzpflanze und dem Erntegut. Durch die Nahrung nehmen Menschen und Tiere diese Rückstände auf, sodass sie sich bei hoher Stabilität des Wirkstoffes im menschlichen Körper anreichern können. Um den Menschen und die Umwelt weitestgehend zu schützen, wurde im Sinne des integrierten Pflanzenschutzes festgelegt, dass chemische PSM erst nach biologischen, biotechnischen oder mechanischen Maßnahmen zum Einsatz kommen sollen. [Ems17]

Zum bewussten Umgang mit chemischen PSM gehört auch, die Pflanzenschutztechnik im Hinblick auf einen geringeren Einsatz der PSM zu verbessern und eine ortsspezifisch optimale Behandlung der Zielfläche zu ermöglichen. Nachfolgend werden der prinzipielle Aufbau der verwendeten Pflanzenschutztechnik und Systemlösungen mit Direkteinspeisungstechnik vorgestellt. Ausgehend von den eingesetzten PSM schließen sich die Hauptanforderungen an, um diese im abstrakten Entwicklungszyklus für neue Systemlösungen der Pflanzenschutztechnik zu berücksichtigen.

2.1.1 Pflanzenschutztechnik im Ackerbau

Konventionelle Pflanzenschutztechnik im Einsatz

Die übliche Verfahrensweise zur Behandlung von Ackerbaukulturen mit chemischen PSM ist die Applikation einer Spritzbrühe mit einer Pflanzenschutzspritze. Spritzbrühen bestehen aus mindestens einem PSM und der Trägerflüssigkeit. Die PSM werden manuell vom Anwender über eine Einspülschleuse in die Pflanzenschutzspritze eingegeben. Anschließend erfolgt die Zusammenführung mit der Trägerflüssigkeit zur Spritzbrühe. Im Spritzbrühetank wird diese bevorratet bis es zur Applikation auf der Zielfläche kommt (siehe Bild 2.1).

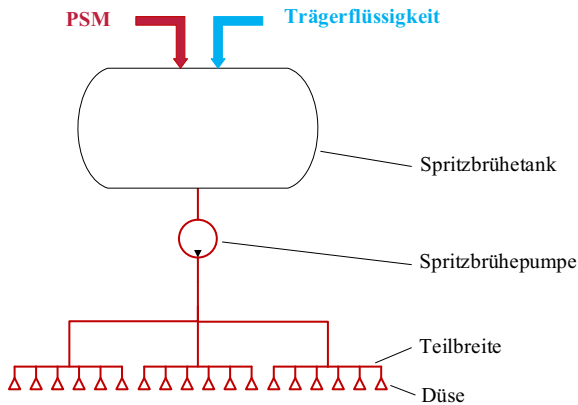


Bild 2.1: Funktionsprinzip einer konventionellen Pflanzenschutzspritze

Abhängig von äußeren Einflüssen, wie der Witterung und der Schlagtopografie, wird die Aufwandmenge (AWM) der Spritzbrühe gesteuert. Diese wird durch die Teilbreiten und Düsen der Pflanzenschutzspritze gefördert und auf die Zielfläche appliziert. Zur Vereinfachung der Bedienung und Einstellung der AWM und damit der Dosierungen der PSM wurden Spritzcomputer entwickelt. Diese regeln die Förderung der Spritzbrühe im Applikationsprozess. Dadurch kann beispielsweise eine konstante AWM unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit auf der Zielfläche ausgebracht werden. Neben der Aufwandmengenregelung übernehmen nach [Her17] diese rechnergestützten Regelungssysteme auch

- die automatische Teilbreitenschaltung,
- die Regelung des Abstandes vom Spritzgestänge zur Zielfläche,
- die Überwachung und Steuerung der Düsenfunktion,
- die automatische Innenreinigung und
- evtl. die Direkteinspeisung von PSM.

Direkteinspeisungssysteme

Motivationen für die Entwicklung von Direkteinspeisungssystemen (DES) entstehen unter anderem aus der Verbesserung des Anwenderschutzes durch kontaktloses Gebinde-management und aus der Möglichkeit zur unabhängigen Regelung einzelner Parameter im Online-Prozess. Online heißt, die Pflanzenschutzspritze detektiert während der aktuellen Applikation Schaderreger oder andere beeinflussende Parameter auf den Spritzprozess, wie

beispielsweise die Witterung oder den Pflanzenzustand. Diese Erfassung hat direkte Auswirkungen auf die Prozessparameter. Ein Spritzcomputer passt die Parameter bedarfsgerecht an [Wal14]. Beispielsweise wird die zusätzliche Einspeisung eines bestimmten PSM begonnen oder die AWM eines anderen PSM wird bei gleichbleibender AWM der Trägerflüssigkeit angepasst.

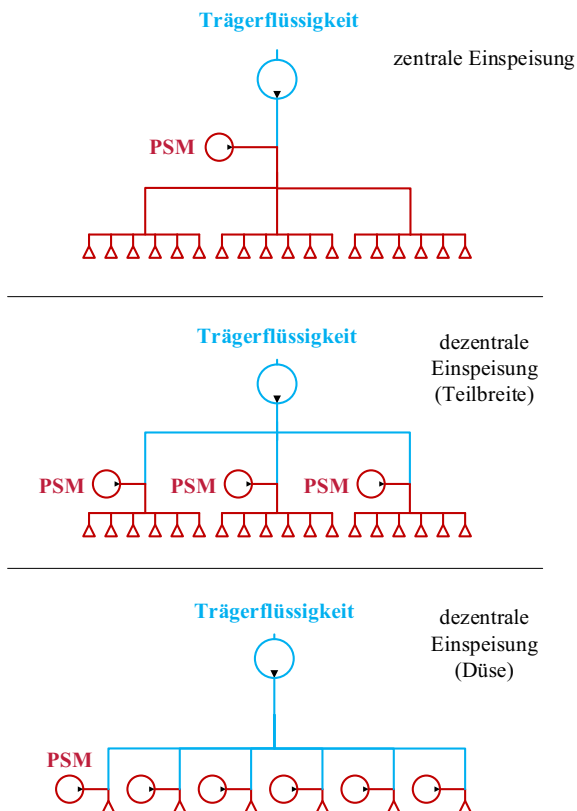


Bild 2.2: Funktionsprinzip von Direkteinspeisungssystemen mit verschiedenen Einspeiseorten. Erweitert nach [Wal14]

Der wesentliche Unterschied zwischen konventionellen Pflanzenschutzsystemen und solchen mit Direkteinspeisungstechnik besteht darin, dass die PSM und die Trägerflüssigkeit bei der konventionellen Technik in der Spritzbrühe vermengt vorliegen. Direkteinspeisungstechnik hingegen bevorratet die Wirkstoffe sowie die Trägerflüssigkeit getrennt voneinander [Sch83]. Die Einspeisung der PSM in den Trägerflüssigkeitsstrom kann systembedingt an unterschiedlichen Stellen erfolgen (siehe Bild 2.2). Unterschieden wird zwischen der

zentralen und der dezentralen Einspeisestelle. Dabei wird die dezentrale Einspeisestelle in die Einspeisung vor den Teilbreiten und vor der Düse differenziert [Wal14].

Jeder Einspeiseort sorgt bei einem DES für andere Eigenschaften. So nimmt die Verzögerungszeit, die sich vom Befehl zur Applikation bis zum Zeitpunkt der Applikation des eingespeisten PSM berechnet, von der zentralen Einspeisestelle bis zur Einspeisung an der Düse ab. Sie beträgt bei der zentralen Einspeisung 10 bis 40 s. Bei einer Einspeisung an den Teilbreiten liegt die Systemträgheit bei 2,75 bis 8,84 s, während bei der Einspeisung an der Düse Verzögerungszeiten von 250 ms erreicht werden. Der Komponenten- und der Reinigungsaufwand des Flüssigkeitssystems nehmen von Systemen mit zentraler Einspeisung bis zu Systemen mit der Einspeisung an der Düse zu, da mehr Einspeisestellen vorliegen. Demgegenüber steht die Flexibilität der Applikation, die bei der Einspeisung an der Düse am größten ist. Mit dieser Einspeisestelle lässt sich am einfachsten eine pflanzenspezifische Zusammenstellung der Spritzbrühe erreichen. [Sök04]; [Wal14]; [Hlo07]

Im Folgenden werden einige entwickelte DES vorgestellt, um die verschiedenen Systemlösungen und die verschiedenen Einspeisestellen von PSM aufzuzeigen. Bereits in drei DES der 80er Jahre wurde der Systemgedanke der Direkteinspeisung in der Pflanzenschutztechnik verwendet. Die Systeme Öko-Lok von BIOTRONIK, DOS-Intro von SCHÖNLEBER und Agroinject von CIBA GEIGY und MSR arbeiten mit einer zentralen Einspeisung. Das System Öko-Lok nutzt eine fahrgeschwindigkeitsabhängige Dosierung aller Komponenten der Spritzbrühe. Diese können einzeln im Betrieb in ihrer Aufwandmenge verändert werden. Abhängig von der Dosierung des Trägerflüssigkeitsstroms erfolgt die Dosierung der PSM im System Agroinject. Eine Veränderung der Konzentrationen in der Spritzbrühe ist im Betrieb nicht möglich. Die Einspeisetechnik im DOS-Intro nutzt einen Druckbehälter, der mithilfe einer pneumatischen Druckbeaufschlagung die PSM nahe der Teilbreiten in den Trägerstrom einspeist. Genannte Verzögerungszeiten der Systeme sind 30 bis 45 s bis die eingestellte Spritzbrühe appliziert werden kann. [Pei92]

Der Versuchsträger der Universität Bonn nutzt das Prinzip der Einspeisung an der Düse. Zur Einspeisung wird das Kugeldosierventil Rapid Reaction Valve (RRV[®]) eingesetzt (Bild 2.3). Der gradlinige Strömungskanal im Ventil wird im geschlossenen Zustand von einer Kugel abgesperrt. Mit Hilfe eines Magnetfeldes kann die Kugel vom Strömungskanal wegbewegt werden. Der maximal mögliche Strömungsquerschnitt beträgt dabei 2 mm. Durch unterschiedlich starke Magnetfelder kann die Öffnung und damit die Durchflussmenge des PSM reguliert werden. Mit diesem System werden Verzögerungszeiten von 250 ms ermöglicht. [Von07]; [Wal14]

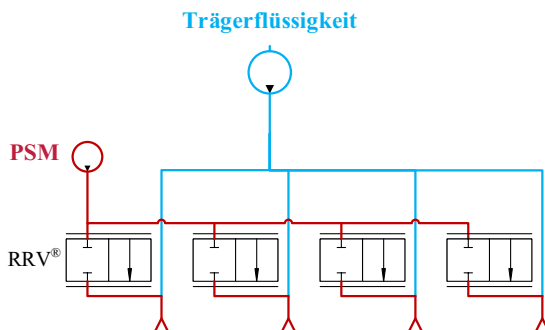


Bild 2.3: Prinzip der Direkteinspeisung an der Düse mit dem Kugeldosierventil RRV®.
Erstellt nach [Von07] [Wal14]

Die Firma Raven Industries bietet das Teilsystem Sidekick zur Direkteinspeisung an. Dieses System dient als Nachrüstereinheit für konventionelle Pflanzenschutztechnik und kann als Direkteinspeisungsmodul in Pflanzenschutzspritzen integriert werden. Das Sidekick besteht im Wesentlichen aus einem Vorratstank für PSM, einer Dosierpumpe, einem Durchflussmesser und einer Mischkammer (Bild 2.4). Der Durchflussmesser ist in die Leitungsführung der Trägerflüssigkeit integriert. Abhängig des hier gemessenen Volumenstroms dosiert die Pumpe die erforderliche Menge des PSM entsprechend der eingestellten Konzentration in die Mischkammer. Die Mischkammer führt die Trägerflüssigkeit mit dem PSM kontinuierlich zusammen zu einer Spritzbrühe. Das System arbeitet als zentrale Direkteinspeisung. [Kre15], [Rav18]

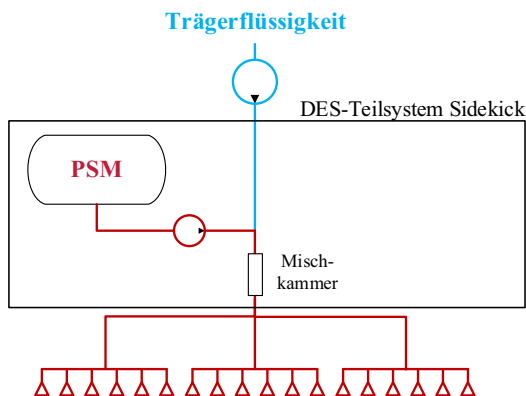


Bild 2.4: Schematischer Aufbau Sidekick der Firma Raven Industries. Nach [Rav18]

Die Firma Dammann und das Julius Kühn-Institut (JKI) stellten 2013 den gemeinsam entwickelten und erprobten Prototypen eines Feldspritzgerätes mit Direkteinspeisung vor. Die Fünfkammerspritze arbeitet mit getrennten Flüssigkeitskreisläufen für drei PSM oder PSM-Mischungen (Bild 2.5).

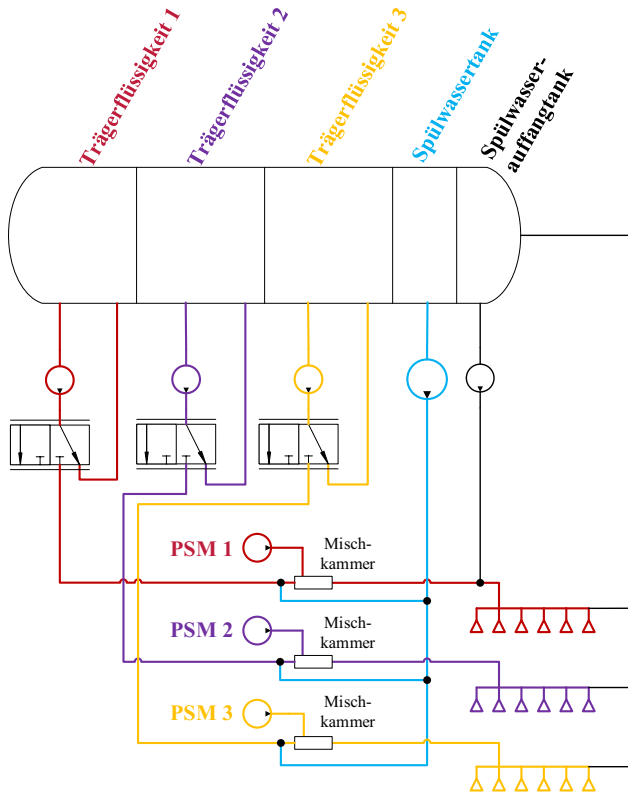


Bild 2.5: Abstrahiertes Funktionsprinzip der Fünfkammerspritze von Dammann / JKI. Basierend auf [Kre14]; [Kre15]; [Dam16]

Die PSM werden abhängig von der Durchflussmenge der Trägerflüssigkeit eingespeist. Die ersten beiden Systeme arbeiten mit Dosierpumpen, die eine mögliche Förderung von 0,15 bis 5,9 l/min besitzen, während das dritte System PSM im Bereich von 0,03 bis 1,18 l/min fördern kann. Dieses System verwendet ein Wechselsystem für PSM-Behälter. Demgegenüber stehen die festinstallierten PSM-Tanks der ersten beiden Systeme, die mit dem konzentrierten PSM befüllt werden. Im Trägerflüssigkeitstank des ersten Systems sind ein Rührwerk und Reinigungsdüsen integriert, sodass zusätzlich eine konventionelle Tankmischung appliziert werden kann. [Kre15]; [Kre14]; [Dam16]

Jedes der drei DES hat seine eigene Düsenleitung. Hier wird in der Ringspülleitung eine Vorladung der einzelnen Spritzbrühen realisiert, um die Verzögerungszeiten des Systems zu minimieren. Ein Reinigungskreislauf ermöglicht in jedem System die Reinigung der Mischkammer und der dahinterliegenden Düsenleitung im Applikationsprozess. Das Spülwasser der drei DES wird aufgefangen und in einem Spülwasserauffangtank gesammelt. Im Applikationsprozess erfolgt eine kontinuierliche Entleerung des Sammel tanks, wodurch die Spülflüssigkeit gleichmäßig auf die Zielfläche gebracht wird. [Kre14]; [Kre15]; [Dam16]

Bewertung entwickelter Direkteinspeisungssysteme

Die vorangegangene Darstellung der DES zeigt, dass in den letzten Jahrzehnten funktionsfähige DES vorgestellt worden sind. Auch bieten Hersteller Pflanzenschutzspritzen mit Direkteinspeisungstechnik an. Meist ist hier eine Nachrüsteinheit ab Werk in das Flüssigkeitssystem der Pflanzenschutzspritze eingebaut. Da diese Systeme jedoch einen geringen Marktanteil haben, scheint die Akzeptanz der Anwender von DES gering zu sein [Kre15]. Dies kann an der erheblich größeren Systemkomplexität gegenüber der konventionellen Technik liegen. Der Anwender kann beispielsweise befürchten, dass auftretende Defekte nicht selber behoben werden können oder die Funktionsweise des Systems nicht überblickt wird. Dadurch werden die Systemkapazitäten nicht voll ausgeschöpft.

Auch die Defizite der DES wirken sich auf den funktionsfähigen Betrieb der Pflanzenschutzspritzen aus. Solange diese nicht behoben worden sind, werden DES in der Praxis nicht etabliert werden können. In der Literatur beschriebene Defizite von Direkteinspeisungstechnik sind [Weg16]; [Wal14]; [Kre15]; [Wal11]; [Boc14]:

- Der eingeschränkte Umgang mit festen PSM. Dosierpumpen für flüssige PSM können feste Stoffe nicht fördern. Systemlösungen zur Förderung von PSM in beiden Aggregatzuständen lassen sich schwer umsetzen, da beispielsweise die Dosiermengen bei festen PSM anders erfasst werden als bei flüssigen PSM. Auch Quellzeiten für feste PSM können bei einer klassischen Einspeisestelle nicht berücksichtigt werden.
- Die Dosiergenauigkeiten werden nicht erreicht. Gerade kleine Dosiermengen bereiten bei dezentraler Einspeisung Probleme. Aber auch aufgrund verschiedener Eigenschaften der geförderten PSM kommt es zu ungenauen Dosierungen. Einflüsse haben beispielsweise die Viskosität und die Formulierungen (siehe Kapitel 2.1.2) der PSM.
- Empfehlungen der Mischreihenfolge bei Spritzbrühen mit mehreren PSM sind ebenfalls bei DES zu berücksichtigen. Einschränkungen einzelner Teilsysteme bei der

Dosiermenge der PSM erfordern evtl. eine andere Mischreihenfolge am Einspeisepunkt als vorgeschrieben.

- Die Verzögerungszeit vom Zeitpunkt der Einspeisung bis zum Erreichen der Sollkonzentration an der Düse beeinträchtigt die Systemagilität gerade bei Systemen mit zentraler Einspeisung. In Kombination mit hohen Fahrgeschwindigkeiten können Prozessparameter nicht genügend schnell angepasst werden, um eine Online-Nutzung von beispielsweise Sensordaten zu integrieren.
- Anfallende Restmengen sind durch den Grundgedanken der Direkteinspeisungstechnik minimiert. Allerdings entstehen durch die entnommenen, nicht verwendeten PSM Restmengen im System. Abhängig von der Systemgestaltung und der AWM der PSM können diese Restmengen größer sein als die applizierten Mengen. Hier wird der Vorteil einer Mitteleinsparung für den Anwender wieder aufgehoben. Dies tritt eher bei Mitteln mit geringen AWM auf.
- Die Reinigung wird durch ein DES aufwendiger als bei konventioneller Technik, da im System reines PSM verarbeitet wird. Gerade bei einer dezentralen Direkteinspeisung liegen bei Applikationsende viele Rückstände von reinem PSM vor. Mit dem Spülwasser wird dieses aus den Leitungen gereinigt, wodurch im Spülwasser wesentlich höhere Konzentrationen auftreten können als bei der Applikation der Spritzbrühe. Zudem erhöht sich die AWM des Spülwassers, da die reinen Stoffe entfernt werden müssen.

2.1.2 Pflanzenschutzmittel und ihre Zusammensetzungen in der Spritzbrühe

Die Eigenschaften und der Verwendungszweck der PSM haben Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit der DES und die Systemgestaltung. Daher ist es notwendig, die PSM im Vorfeld genauer zu betrachten.

Zu Beginn der chemischen Pflanzenschutzanwendung im Ackerbau steht die Auswahl der PSM abhängig vom Schaderreger. Welcher Schaderreger eingedämmt werden soll, ist entscheidend für die Wirkstoffwahl. Wirkstoffe werden durch ihre Einsatzbereiche und ihre Wirkungsweise beschrieben. Der Bereich des Einsatzes teilt sich dabei in verschiedene Gruppen auf, die anhand ihrer abtötenden oder beeinflussenden Wirkung auf den Schaderreger beschrieben werden [Bör09]; [Ems17]:

- Fungizide haben eine abtötende Wirkung auf pilzliche Krankheitserreger. [Bör09]
- Insektizide wirken auf tierische Schaderreger. [Bör09]
- Herbizide vernichten unerwünschte Pflanzen, die mit den angebauten Nutzpflanzen konkurrieren oder Erntegut verunreinigen. [Ems17]

- Wachstumsregler beeinflussen verschiedene Pflanzenteile der Nutzpflanzen in ihrem Wachstum.

Der optimale Anwendungstermin von PSM ist abhängig von ihrer Wirkungsweise. Unterschieden wird zwischen eradikativen, protektiven und kurativen Verfahren [Bör09]:

- Eradikativ eingesetzte PSM zielen auf die Abwehr der Schaderreger ab, bevor diese die Nutzpflanze infizieren können. Sie werden vor dem Befall appliziert.
- Protektive Behandlungen werden durchgeführt, um Pflanzen vor dem Befall durch den Schaderreger vor diesem zu schützen. Der Schaderreger wird bei Erstkontakt mit einer behandelten Nutzpflanze eliminiert.
- Kurativ wirkende PSM werden nach dem Befall des Schaderregers eingesetzt. Sie erzielen einen heilenden Effekt durch die Tötung der Schaderreger von befallenen Nutzpflanzen.

Das Verhalten von Wirkstoffen auf der Nutzpflanze ist ebenfalls ein Kriterium zur Klassifizierung. Es wird zwischen protektiven und systemischen Wirkstoffen unterschieden [Bör09]:

- Protektive Wirkstoffe bleiben auf den behandelten Pflanzenteilen anhaften und bieten einen äußerlichen Schutz. Sie sind daher nur für protektive Behandlungen nutzbar, da eingedrungene Schaderreger nicht mehr bekämpft werden können.
- Systemische Wirkstoffe werden von der Pflanze aufgenommen, gleichmäßig verteilt und nachhaltig in dieser gespeichert.

Um den Wirkstoff zu einem chemischen PSM weiterzuentwickeln, werden diesem weitere Hilfs- und Zusatzstoffe hinzugefügt. Diese verbessern die Wirkung sowie die Handhabung des PSM [Ems17]. Beispielsweise werden protektive Wirkstoffe durch atmosphärisch bedingte Einflüsse, wie Wind, Regen oder Licht, in ihrer Wirkung zeitlich begrenzt [Bör09]. Durch die Beigabe von Hilfsstoffen kann die Persistenz, also die Wirkdauer, eines PSM erhöht werden.

Pflanzenschutzspritzen applizieren die Spritzbrühe auf die Nutzpflanze. Um das PSM mit der Trägerflüssigkeit (meist Wasser) vermischen zu können, werden Wirkstoffe, Hilfs- und Zusatzstoffe mit Formulierungshilfsstoffen zusammengebracht. Daraus ergeben sich flüssige, pulverförmige oder granuliert Formulierungen von PSM, wie Emulsionen und Suspensionen bei denen die meist unpolaren Wirkstoffe mit dem Dipolcharakter des Wassers in Verbindung gebracht werden und somit für die Zubereitung einer Spritzbrühe verwendet werden können [Bör09]. Formulierung sind die Zustandsformen der PSM. Jede hat ihre eigenen Vorzüge und Eigenschaften. Ausgewählte Eigenschaften der Formulierungen werden in Tabelle 2.1 vorgestellt.

Tabelle 2.1: Häufige Formulierungen von Pflanzenschutzmitteln im Ackerbau nach [Bör09]

Formulierung	Abk.	Eigenschaften
Suspensionskonzentrate	SC	Suspensionen fester Wirkstoffe in Wasser. Mögliche Entmischung bei der Lagerung.
Emulgierbare Konzentrate	EC	Lösung von festen und flüssigen Wirkstoffen in umweltbelastenden, organischen Lösungsmitteln.
Wasserdispergierbare Granulate	WG	Anwenderschutz durch Granulate. Die Verteilung im Wasser wird unterstützt vom Dispergiermittel.
Wasserlösliche Konzentrate	SL	Konzentrierte Lösungen von Wirkstoffen in Wasser oder wassermischbaren Lösungsmitteln.
Mikroverkapselung, Kapselsuspensionen	CS	Anwenderschutz und verlängerte Wirkungsdauer durch langsames und kontrolliertes Freisetzen des Wirkstoffes.
Emulsionen	EW	Bessere Eigenschaften und Umweltverhalten gegenüber anderen Lösungen von Wirkstoff in Wasser.
Wasserdispergierbares Pulver	WP	Gemahlener fester Wirkstoff mit Hilfsstoffen in einem wasserlöslichen Beutel.

Die Verarbeitung der PSM im Spritzprozess wird durch die Eigenschaften der PSM beeinflusst. Solche Eigenschaften sind beispielsweise der Aggregatzustand, die AWM, die Viskosität bei flüssigen Produkten, die Wasserlöslichkeit und die Handhabung des Produktes. Diese sind bei der Entwicklung von Pflanzenschutzspritzen zu berücksichtigen, um mit Quellzeiten, notwendigem manuellen Aufschütteln oder einer speziellen Förderung der Produkte zu reagieren.

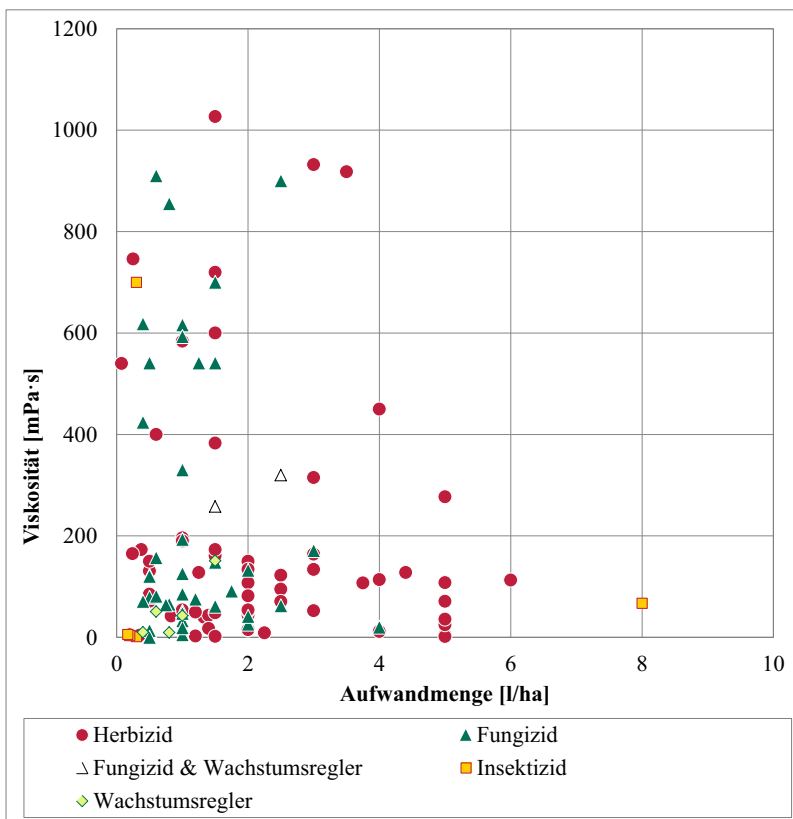


Bild 2.6: Aufwandmengen gegenüber der dynamischen Viskosität von 325 flüssigen Pflanzenschutzmitteln bei 20°C. Daten aus [Bun18a]; [Bun18b]

Die dynamische Viskosität der flüssigen PSM ist gerade bei der volumenstromabhängigen Förderung eine entscheidende Größe [Wal11]. Zur Einschätzung von Anforderungen an eine Pflanzenschutzspritze ist in Bild 2.6 die AWM gegenüber der dynamischen Viskosität von flüssigen PSM aufgetragen. Erkennbar ist, dass PSM mit hoher Viskosität im Bereich niedriger AWM liegen, während PSM mit hohen AWM eine geringere Viskosität besitzen. Das theoretische Maximum einer hohen AWM bei hoher dynamischer Viskosität tritt nicht auf.

Tabelle 2.2: Aufwandmengenbereiche von Pflanzenschutzmitteln; Daten aus [Bun18a]; [Bör09]; [Bun18b]

Aufwandmenge	minimal	maximal
festes PSM	0,02 $\frac{kg}{ha}$	8 $\frac{kg}{ha}$
flüssiges PSM	0,0125 $\frac{l}{ha}$	10 $\frac{l}{ha}$

Anhand ihres Aggregatzustandes können PSM für Ackerbaukulturen in feste und flüssige Präparate eingeteilt werden. Der Bereich der AWM dieser zwei Gruppen veranschaulicht einmal mehr die Vielfältigkeit der Produkte (Tabelle 2.2).

2.2 Prozessanalyse und Bewertung von Pflanzenschutzsystemen

Neue Systemideen von Pflanzenschutzspritzen wurden in den letzten Jahren bis zum Prototypenstatus entwickelt, meist jedoch nicht in das Produktportfolio der Hersteller aufgenommen. Gründe und Defizite wurden in Kapitel 2.1.1 genannt. Diese werden im Nachfolgenden zusammen mit den Einflüssen auf die Entwicklung und den Entwicklungszyklus von DES beschrieben.

Für eine erfolgreiche Markteinführung von Produkten muss der Hersteller die Funktionsfähigkeit seines Systems gewährleisten. Diese Gewährleistung wird durch Prüfungen des Systems abgesichert. Solch eine Prüfeinrichtung steht im Mittelpunkt dieser Arbeit. Daher sind in Kapitel 2.2.2 die Möglichkeiten der Prüfung von Pflanzenschutzspritzen und die relevanten Prüfmöglichkeiten anderer Fachbereiche aufgeführt.

2.2.1 Entwicklungszyklus am Beispiel Direkteinspeisung

Bevor die Entwicklung eines DES vorangetrieben werden kann, sind zunächst die Anforderungen an die Teilsysteme zu identifizieren. Diese Anforderungen leiten sich aus den Bereichen der PSM, der Applikation und der Gestaltung des Systems ab. Beispielsweise können die Verzögerungszeiten des Systems bei notwendiger Online-Fähigkeit und die Zuverlässigkeit der Arbeitsweise des DES genannt werden. Außerdem implizieren verschiedene PSM, wie oben gezeigt, unterschiedliche Handhabungen im Prozess. Daneben ist die Zumischreihenfolge der PSM zu beachten, um Schäden an der Pflanzenschutzspritze sowie an den Kulturen vorzubeugen. Sonst kann es zu chemischen Wechselwirkungen kommen, sodass beispielsweise das Leitungssystem zugesetzt wird. Aufgrund von Wirkverlusten nach Anbruch des PSM-Behälters oder nach der Vermischung der PSM mit der Trägerflüssigkeit, sind die PSM im System zügig zu verarbeiten und zu applizieren. Auch die Wirkungsgruppen der PSM beeinflussen die Applikation. Beispielsweise können bestimmte

Insektizide auf eine Randflächenbehandlung reduziert werden. Diese und weitere Anforderungen haben Einflüsse auf die Komponentenauslegung, die Zusammenstellung des Flüssigkeitskreislaufes und die Systemregelung (siehe Bild 2.7). [Mar18] [Boc14]; [Wal11]

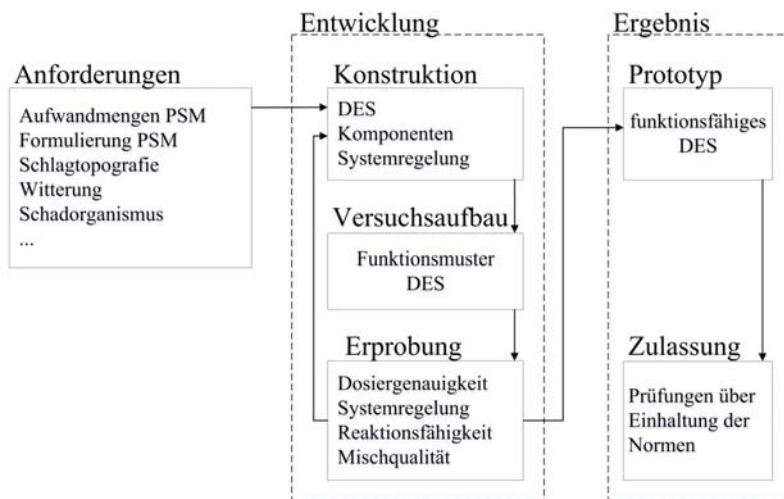


Bild 2.7: Entwicklungszyklus eines DES. Entwickelt nach [VDI93]

Ist das DES konstruiert, wird ein Funktionsmuster aufgebaut. Dieses ist anhand verschiedener Versuchsszenarien und Prüfungen auf seine Funktionsfähigkeit und die Erfüllung der Anforderungen hin zu erproben. Die Qualität eines Flüssigkeitssystems mit Direkteinspeisung kann an folgenden Eigenschaften ermittelt werden [Jul13a] [Ems17]; [ISO17b]:

- Sichere Befüllereinrichtung bzw. Koppelstelle für PSM
- Dosiergenauigkeit der PSM sowie der Trägerflüssigkeit
- Qualität der Vermischung durch Konzentrationsgenauigkeit in der Spritzbrühe
- Genauigkeit der Querverteilung und Applikation
- Verzögerungszeiten vom Befehl zur Einspeisung bis zur Applikation des PSM.
- Volumen der Restmengen und Reinigungsflüssigkeiten
- Leichte und gründliche, systeminterne Reinigung

Prüfungen der Dosiergenauigkeit, Systemregelung und Reaktionsgeschwindigkeit des Funktionsmusters werden mit einfachen standardisierten Verfahren durchgeführt. Wird das Funktionsmuster positiv getestet, erstellt der Hersteller einen Prototyp. Dieser wird neben der

Erprobung im Betriebseinsatz auch an die Zulassungsstellen gegeben. Zugelassen wird ein Gerät, wenn es spezifizierte Normvorgaben einhält.

2.2.2 Prüfungen des Flüssigkeitssystems von Pflanzenschutzspritzen

Prüfstellen wie das JKI untersuchen Pflanzenschutzspritzen auf die Einhaltung der Normvorgaben. Die Vorgaben und Messungen sind in den JKI-Richtlinien und in ISO 5682-2 sowie ISO 5682-3 geregelt. Der Umgang mit PSM im Flüssigkeitssystem eines Pflanzenschutzspritzgerätes wird vom JKI anhand folgender Prüfungen untersucht:

- Prüfung des Rührwerks
- Genauigkeit der Dosierung von Dosierpumpen
- Messungen der Arbeitsqualität von Mischkammern
- Prüfung der gleichmäßigen AWM beim Spritzvorgang
- Prüfung des Volumenstroms einer einzelnen Düse im Gestängeverbund
- Gleichmäßigkeit der Querverteilung bei Pflanzenschutzgeräten für Flächenkulturen
- Messung der direkten Abdrift beim Ausbringen von flüssigen PSM
- Prüfung von Reinigungseinrichtungen

Bei den Prüfungen werden verschiedene Messverfahren angewandt und Prüfgrößen ermittelt. Durchgeführt werden:

- volumetrische Messungen
- gravimetrische Messungen
- optische Messungen

Die volumetrischen Messverfahren werden dazu genutzt, die Gleichmäßigkeit der AWM beim Spritzvorgang, des Volumenstroms einer einzelnen Düse im Gestängeverbund und der Querverteilung zu überprüfen. Die Überprüfung der AWM erfolgt unabhängig vom Spritzbehälterfüllstand. Es wird der errechnete Mittelwert aus fünf Messungen der AWM als Erwartungswert festgelegt. Die gemessene AWM beim Spritzvorgang darf $\pm 10\%$ vom Erwartungswert abweichen. Der Volumenstrom einer einzelnen Düse gleichen Typs im Gestängeverbund darf um $\pm 5\%$ vom gemeinsamen Mittelwert aller Düsen im Gestängeverbund variieren. Dabei ist zu beachten, dass der maximale Fehler der Volumenstrommessung $\pm 2,5\%$ beträgt. [ISO17a][Jul13a]

Zur Untersuchung der Querverteilung wird ein Rinnenprüfstand verwendet. Der Prüfstand fängt die applizierte Flüssigkeit aus den Düsen über mindestens 15 m Gestängebreite auf. Als Versuchsflüssigkeit wird Wasser verwendet. Jede Rinne ist dabei 100 mm ($\pm 2,5$ mm) breit. Anhand des aufgefangenen Volumens in jeder Rinne wird der Variationskoeffizient der

Messung bestimmt. Der Variationskoeffizient des Flüssigkeitsvolumens zwischen den einzelnen Rinnen darf maximal $\pm 7\%$ betragen. [ISO17b][Jul13b]; [Jul13a]

Zur Untersuchung der Rührwerke und der Behälterinnenreinigung werden gravimetrische Messungen des PSM-Vergleichsproduktes herangezogen. Als PSM-Vergleichsprodukt wird technisches Kupferoxychlorid eingesetzt. Eine 1 % Suspension aus dem Kupferoxychlorid wird zu Beginn der Rührwerksprüfung in den Behälter des Pflanzenschutzspritzgerätes gegeben. Ist die Suspension durch ausreichendes Rühren homogen, werden an drei Stellen zwei Nullproben entnommen. Der Mittelwert der Proben wird gebildet. Dieser darf um $\pm 5\%$ von der Vorgabe einer 1 % Suspension abweichen. Wird die Bedingung erfüllt, wird der Mittelwert als späterer Erwartungswert der Messung festgelegt. Danach ruht die Suspension 16 h im Behälter. [ISO04] [Jul13c]

Zur Weiterführung der Prüfung wird das Rührwerk nach der Ruhephase 10 Minuten bei maximaler Rührleistung angeschaltet. Bei weiterlaufendem Rührwerk werden sechs Proben an den drei Stellen im Tank entnommen. Danach wird die Versuchsflüssigkeit aus dem Tank gefördert. Der mittlere Arbeitsdruck der zugelassenen Düsen wird hierbei eingestellt. Weitere Proben werden aus der abfließenden Suspension entnommen. Bei Behältern mit einem Nennvolumen über 400 l werden je zwei Proben in Schritten von 5, 10 und 15 % des Nennvolumens abgefüllt. Ist das Nennvolumen des Behälters maximal 400 l, erfolgt die Probenentnahme nach je 50 l. [Jul13c]

Durch den gewogenen Trockenmassegehalt des Kupferoxychlorids wird anschließend die Konzentration jeder Probe bestimmt. Ein Mittelwert wird über die zwei zusammengehörenden Proben gebildet. Dieser wird auf den Erwartungswert bezogen, wodurch eine relative Abweichung der Proben errechnet wird. Die Konzentrationen der Proben dürfen maximal um $\pm 15\%$ vom Erwartungswert abweichen, damit das Rührwerk die Prüfung besteht.

Legende:

\bar{c}	durchschnittliche Konzentration der Proben,	c_{Probe}	Konzentration der Probe,
c_S	Konzentration der Suspension,	$\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	Kupferoxychlorid,
EW	Erwartungswert,	H_2O	Wasser,
$m_{\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl},\text{tr.}}$	Trockenmasse des Kupferoxychlorids,	$P_{\text{Rührwerk,max}}$	maximale Rührleistung,
$V_{\text{Behälter}}$	Volumen des Spritzbrühebehälters		

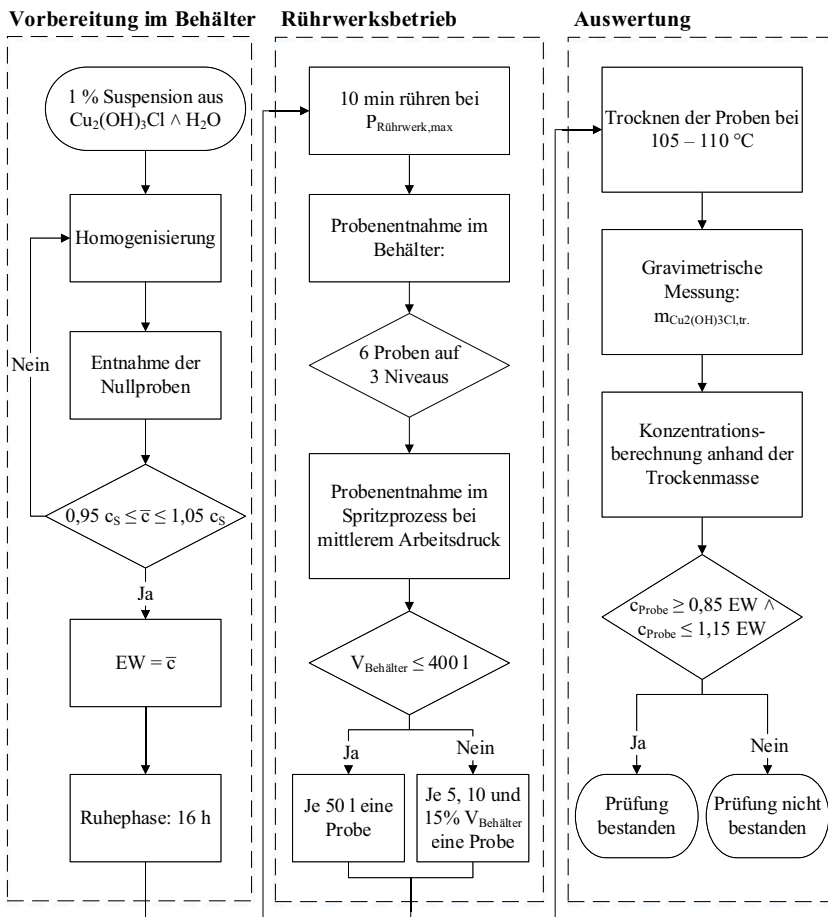


Bild 2.8: Ablaufplan der Rührwerksprüfung. Erstellt nach [Jul13c]

Bei der Behälterinnenreinigung nehmen die Konzentrationen des Kupferoxychlorids im Verlauf der Reinigung ab. Um kleinste Mengen bis zu 1 ppm nachweisen zu können, wird ein Atom-Absorptions-Spektrometer zur Hilfe genommen.

Die optischen Messungen teilen sich in Verfahren der Messung der Fluoreszenz und der Messung mit einem Spektralphotometer auf. Die Messung der Fluoreszenz wird für die Untersuchungen der Abdrift im Freiland und der Dosiergenauigkeit sowie der Arbeitsqualität der Mischkammer bei DES verwendet. Getestet wird die Abdrift auf Freiflächen. Ein fluoreszierender Farbstoff in ausreichender Konzentration wird zu der Versuchsflüssigkeit hinzugegeben. Verwendbare Farbstoffe sind Brillant-Sulfo-Flavin (BSF) oder Pyranin. Sie sind in geringen Mengen nachweisbar. Für die Prüfung wird die Freifläche mit Kollektoren zur Messung des Schwebeanteils und Objektträgern zur Messung der Bodensedimente versehen. Über die Fluoreszenz der aufgefangenen Proben wird die vorliegende Konzentration der Versuchsflüssigkeit in verschiedenen Abständen ermittelt [Jul13d]. Im nachfolgenden Kapitel werden die Grundlagen der Messung der Fluoreszenz näher beschrieben.

Auch die Prüfung von Dosiergenauigkeiten der Dosierpumpen und der Arbeitsqualität von Mischkammern im DES wird vom JKI mit Hilfe der Fluoreszenz durchgeführt. Als Versuchsstoff wird eine 0,1 % Stammlösung mit BSF verwendet. Das BSF-Wasser-Gemisch wird am Düsenausgang aufgefangen. Die Konzentration der Proben wird durch die Messung der Fluoreszenz ermittelt und darf $\pm 7 \%$ vom Sollwert abweichen. [Kre14] [Kre15]

Dai et al. (2019) nutzt zur Untersuchung der Mischqualität bei der Direkteinspeisung an der Düse ebenfalls die Eigenschaften von fluoreszierenden Farbstoffen in Verbindung mit Glycerin als simuliertes flüssiges PSM. Hinter der Mischstrecke werden in festgelegten Zeitintervallen Aufnahmen von der Versuchsflüssigkeit erstellt. Die Standardabweichung der Helligkeit jedes Bildes quantifiziert die Konzentrationsschwankungen der Versuchsstoffe mit Hilfe der Analysefunktion des Auto-Korrelationskoeffizienten. [Dai19]

Für Untersuchungen der Reinigungseinrichtungen wird die Spektralphotometrie verwendet. Ein viskoses Referenzprodukt in Verbindung mit dem Farbstoff Duasynsäure blau dient als Versuchsstoff bei der Qualitätsüberprüfung von Reinigungseinrichtungen einer Einspülschleuse. Das verwendete Referenzprodukt ist in ISO 21278-1 Anhang B aufgeführt. [ISO08]

Da die Einspülschleuse im Betrieb mit reinem PSM in Kontakt kommt, wird speziell bei dieser Prüfung das viskose Referenzprodukt hinzugezogen, um eine erschwerte Reinigung zu simulieren. Nach der Durchführung der Reinigung werden Proben entnommen. Mit dem Spektralphotometer werden die Rückstände des Farbstoffes in diesen ermittelt. [ISO08]

2.2.3 Grundlagen und Anwendung ausgewählter Messmethoden

Um einfache Prüfverfahren für die Untersuchung der Mischqualität im Flüssigkeitskreislauf der Pflanzenschutztechnik zu ermitteln, wird nachfolgend eine Auswahl von Messmethoden dargestellt, die auch für die Pflanzenschutztechnik relevant sein können. Die klassische

Verfahrenstechnik nutzt für die Untersuchung von Flüssigkeiten zum einen die Fluoreszenz zum anderen rheologische Eigenschaften. Die Messung der Fluoreszenz zur Bestimmung der Konzentration eines Stoffes wird in vielen Fachbereichen, beispielsweise der Chemie und Biotechnologie, verwendet. Wie oben dargestellt, wird diese Messmethode auch für die Prüfung der Pflanzenschutzspritzen eingesetzt. Weiterhin können Verfahren der Qualitätsprüfung auch für die Pflanzenschutztechnik von Bedeutung sein. Aspekte der zerstörungsfreien Materialprüfung mit der automatischen Sichtprüfung eignen sich auch zur Untersuchung von Flüssigkeiten. Daher wird neben der rheologischen Untersuchung und der Messung der Fluoreszenz auf die zerstörungsfreie Materialprüfung eingegangen.

Messung rheologischer Eigenschaften

Mit einem Rheometer werden die rheologischen Eigenschaften eines Stoffes bestimmt. Ein verwendetes Messprinzip ist das Rotationsrheometer. Hier werden durch eine Scherbeanspruchung Eigenschaften wie die Scherviskosität ermittelt. Solche Rheometer nutzen verschiedene Geometrien. Verwendet werden koaxiale Zylinder, Platte/Platte-Anordnungen und Kegel/Platte-Anordnungen. [Esc93]

Aufgrund des Untersuchungsraumes der Bechergeometrie bei koaxialen Zylindern, kann diese Geometrie für niedrigviskose Stoffe eingesetzt werden. Der zu untersuchende Stoff wird in die Bechergeometrie eingegeben. Ein Messzylinder wird in den Becher eingetaucht und vom Untersuchungsstoff umschlossen. Bei üblichen Messprozeduren wird der Messzylinder mit verschiedenen Geschwindigkeiten betrieben. Anhand der gemessenen Schubspannung werden die Fließfunktion und damit die Scherviskosität des Stoffes ermittelt. [Esc93]

Messung der Fluoreszenz

Fluoreszenz ist die Eigenschaft von Materialien, Licht zu emittieren. Dazu muss eine geeignete Anregung stattfinden. Licht mit einer Wellenlänge λ wird im Material absorbiert und regt gebundene Elektronen an, auf ein höheres Energieniveau zu gehen. Diese fallen über Zwischenzustände auf ihr normales Energieniveau zurück. Hierdurch wird Licht emittiert, das eine geringere Energie und eine größere Wellenlänge λ_F besitzt als das anregende Licht (siehe Bild 2.9). [Bey12] [Bre93] [Lüb13]

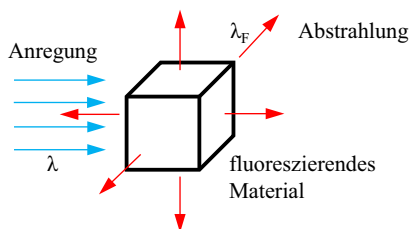


Bild 2.9: Anregung von fluoreszierenden Materialien [Bey12]

Im Messverfahren werden die zu untersuchenden Proben in eine Prüfkammer eines Messgerätes eingegeben. Das Gerät extrahiert Licht einer bestimmten Wellenlänge und misst die Emissionswellenlänge. Außerdem werden die zurückgegebenen Photonen gezählt. Die Absorption im Material und die Streuung des Lichtes haben jedoch keinen linearen Zusammenhang zur Konzentration des Materials. D. h. gerade geringe Konzentrationen des Materials benötigen eine Vergleichskurve. Also werden bei jeder Messung parallel Referenzproben mit bekannter Konzentration des Materials untersucht, um Rückschlüsse auf die vorliegenden Konzentrationen der Proben ziehen zu können. [Lüb13]

Bildverarbeitung und Bildanalyse der zerstörungsfreien Materialprüfung

Die zerstörungsfreie Materialprüfung nutzt verschiedene optische Messverfahren. Sie wird in der Industrie eingesetzt, um Fehler im Werkstoff aufzudecken, ohne das Werkstück zu beschädigen. Ob die optischen Eigenschaften oder die räumliche Gestaltung eines Untersuchungsobjektes relevant sind, ist für die Auswahl einer Materialprüfung zu klären. Die Verfahren lassen sich anhand dieser Klassifizierung der Eigenschaften unterteilen (siehe Bild 2.10). [Bey12]; [Bre93]

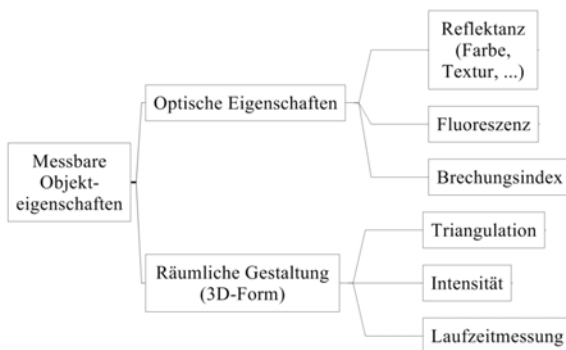


Bild 2.10: Optisch messbare Objekteigenschaften. Nach [Bey12]

Zur Auswertung der verschiedenen optischen Messungen wird die Bildverarbeitung genutzt. Diese ist individuell auf die Messgröße und das zu untersuchende Material anzupassen. In Bild 2.11 wird die Bildverarbeitung aufgeteilt in die drei Prozessschritte der Bildfunktionen, der Bildanalyse und der Bildmanipulation. Bei den Bildfunktionen sind die relevanten Größen für die Bildverarbeitung festzulegen. Entscheidend ist, welche Bildinformationen in die Bildanalyse übergeben werden. Eine Rolle spielt die Wahl des Farbraums, denn auf seiner Basis wird die nachfolgende Analyse durchgeführt. Je nachdem, welche Messgrößen untersucht werden sollen und welche Auswirkungen diese Messgrößen auf die Bildeigenschaften haben, lassen sich unterschiedliche Farbräume wählen [Bre93]. Ebenfalls haben die Wahl des verwendeten Systems zur Bildanalyse und die einzelnen technischen Verfahren Einflüsse auf die Wiedergabe des Bildes. Wenn beispielsweise das Bild im Standardformat JPEG oder TIFF abgespeichert wird, ist das verwendete Speicherformat acht Bit. D. h. Bildinformationen können verloren gehen, wenn die Umwandlung den Wertebereich der Farben auf 0 bis 255 einschränkt, obwohl im Aufnahmeverfahren ein größerer Wertebereich aufgezeichnet wird. [Gon14]

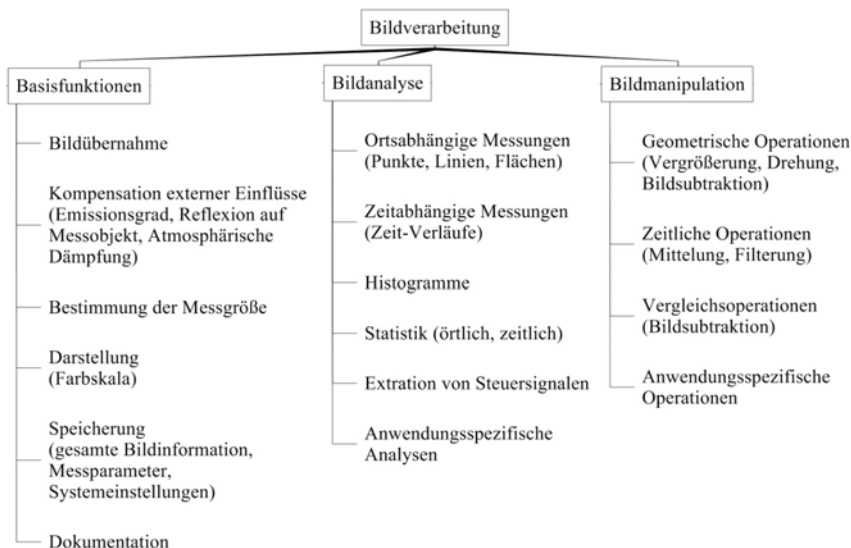


Bild 2.11: Strukturierung einer Bildverarbeitung. Nach [Bre93]

Wie die Basisfunktionen ist auch bei der Bildanalyse die zu untersuchende Eigenschaft des Materials in der Aufnahme entscheidend. Ob eine zeitabhängige Messung erforderlich ist, ist anhand der Materialveränderung während der Prüfung festzulegen. Erfolgt beispielsweise eine Infrarotmessung erfährt das Material während der Prüfung einen Energieeintrag und

verändert sich. Die Bildinformationen sind dementsprechend zeitabhängig. Eine weitere Analysefunktion ist die der Histogramme. Sie abstrahieren die Bildinformationen durch einfaches Zählen der Farbwerte eines Bildes. Hier kann beispielsweise ein dominanter Farbwertebereich oder die Kontraststärke eines Bildes mathematisch identifiziert werden.

Zusätzlich zur Bildanalyse kann eine Bildmanipulation notwendig sein. Manipuliert werden Aufnahmen durch verschiedene Filterfunktionen oder durch Veränderungen der Geometrie. Auch die Bildsubtraktion kommt bei verschiedenen Prüfverfahren zum Einsatz. [Bre93]

Bei der Fehleridentifizierung in Schweißverbindungen mit Hilfe von Röntgenstrahlen ist z. B. eine Bildsubtraktion notwendig. Die Schwärzung einer Durchstrahlungsaufnahme der Schweißnähte ist kein hinreichendes Kriterium für einen Fehler in der Schweißverbindung. Begründet liegt dass in den Unregelmäßigkeiten der Nahtoberfläche, die zusätzliche Bildstrukturen hervorrufen. Um einen Fehler in der Naht erkennen zu können, ist die Umgebung des Fehlers ebenfalls von Bedeutung. Das Signal des Bildhintergrundes der Röntgenaufnahme muss in diesem Fall subtrahiert werden, um eine eindeutige Fehleridentifizierung durchführen zu können (Bild 2.12). [Bre93]; [Bey12]



Bild 2.12: Röntgenaufnahme einer Schweißnaht (li.); Hintergrundbild (mi.); Differenzbild (re.). [Bre93]

Farbräume

Die Farbe eines Objektes ist von zentraler Bedeutung in der Bildverarbeitung. Sie ist jedoch keine Eigenschaft oder Zustand des betrachteten Objektes. Sie ist eine subjektive Sinneswahrnehmung, die von Umgebungseinflüssen und dem Spektrum der Beleuchtung abhängt. In der Photographie wird die Methode des Weißabgleichs genutzt, um den Beleuchtungseinfluss zu filtern. Obwohl Farbe eine physiologische Wahrnehmung ist, wird sie bei Messverfahren in eine physikalische Größe gezwungen. Als Grundlage für die Beschreibung von Farben dienen die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau. Diese sind im menschlichen Auge als die drei verschiedenen Lichtrezeptoren wieder zu finden und ermöglichen dem Menschen das Farbsehen. Die physikalischen Farbräume nutzen diese drei Farben, um durch die Variation ihrer Mischung den Farbtönen auszubilden. Entscheidend für das Farbsehen sind zudem die Helligkeit und die Sättigung der Farbtöne. Farbräume

integrieren diese auf unterschiedliche Weise in die Beschreibung der Farbe. Nachfolgend werden drei verbreitete Farbräume vorgestellt: der RGB- (Rot, Grün, Blau), der HSV- (hue, saturation, value) und der CIE-Farbraum (von der Commission Internationale de l'Éclairage CIE entworfenes Farbmodell). [Bey12]; [Bre93]

Der RGB-Farbraum wird z. B. für dieameratechnik genutzt. Die Beschreibung der Farbtöne durch einen Rot-, einen Grün- und einen Blauanteil (RGB), entspricht der technischen Farberfassung mit Hilfe von Sensoren, die für die Spektralbereiche unterschiedlich empfindlich sind. Die drei Grundfarben werden in einem dreidimensionalen Koordinatensystem aufgetragen und spannen einen Würfel auf (siehe Bild 2.13). Jeder Raumpunkt des Würfels stellt eine Farbe dar. Sind die Farbanteile in einem Verhältnis von 1:1:1, entspricht das den Grautönen, die alle auf einer Achse liegen, die diagonal durch den Raum von Schwarz nach Weiß verläuft. Ihr Ursprung ist der sogenannte Schwarzpunkt des Farbraums. [Bre93] [Bey12]

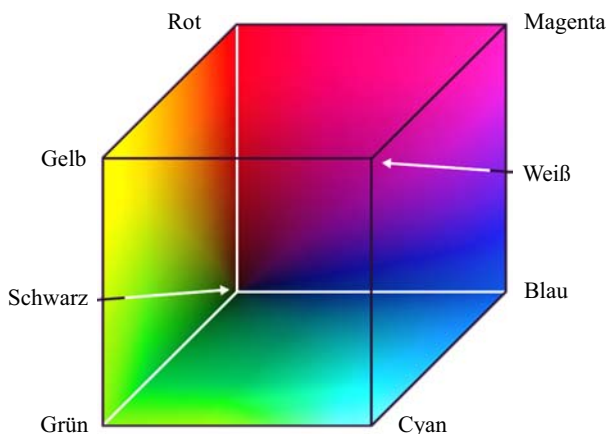


Bild 2.13: RGB-Farbraum. [Bey12]

Die menschliche Farbwahrnehmung entspricht dem HSV-Farbraum am besten. Die Beschreibung des Farbtons (hue), der Sättigung (saturation) und des Hellwerts (value) ist vergleichbar mit dem menschlichen Verständnis von Farben [Bey12]. Der Farbton (H) wird im HSV-Farbraum durch einen Kreis aufgespannt. Der Mittelpunkt des Kreises bildet den Weißpunkt. Die Sättigung (S) ist die Beschreibung der Lage des Farbtons im Kreis. Sie kann Werte von null bis eins annehmen, vom Mittelpunkt (0) bis hin zur Lage auf dem Farbkreis (1) bei einer 100 % Sättigung. Erweitert man den Farbkreis zu einem Kegel beschreibt der Hellwert (V) die Höhe des Kegels. Er nimmt ebenfalls Werte von null bis eins an. Die volle Helligkeit liegt im Kreismittelpunkt (1) vor und reduziert sich zur Kegelspitze

(0). Die RGB-Farbwerte können in den HSV-Farbraum transformiert werden (siehe [Ebn10]). Die Farbräume HSI und HSL sind ähnlich dem HSV-Farbraum, jedoch nicht identisch. Im HSI wird im Gegensatz zu dem Hellwert (V) die Intensität (intensity) des Farbtons behandelt und beim HSL die relative Helligkeit (lightness). [Bey12]; [Gon14]; [Bur09]

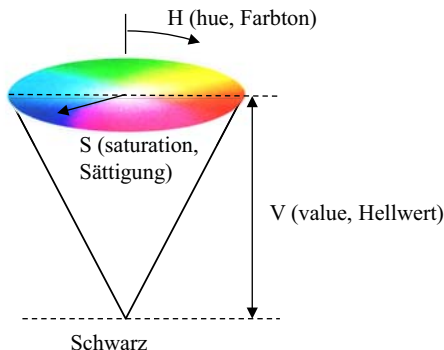


Bild 2.14: HSV-Farbraum. Erstellt nach [Gon14] und [Ebn10]

Die CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) hat 1931 eine Vorgehensweise zur Messung der Farbvalenz einer Lichtquelle standardisiert. Die Basis des CIE-Farbraums bildet die Hellempfindlichkeit des Beobachters. Dieser Beobachter sieht zeitgleich die Überlagerung von drei Lichtquellen (rot, grün, blau) und eine Testlichtquelle (Bild 2.15). Die Intensität der drei Lichtquellen wird so eingestellt, dass ihre Überlagerung von der Testlichtquelle nicht mehr unterscheidbar ist. Da die Hellempfindlichkeit des Auges ab einer Wellenlänge von 700 nm stark nachlässt, entspricht die Intensität der roten Lichtquelle dem 72,0962-fachen der blauen Lichtquelle. Die grüne Lichtquelle ist in ihrer Intensität um 1,3791 größer als die der Blauen. Der CIE-Farbraum wird durch die Normfarbwerte X, Y, Z aufgespannt. Sie ergeben sich aus der ermittelten Funktion des Messexperiments mit Spektralfarben und einer nachfolgenden Berechnung, die drei identische Farbwerte zur Folge hat [Bey12]; [Ebn10]. Genutzt wird die objektive Kennzeichnung der Farben durch den CIE-Farbraum beispielsweise für Farbwiedergaben bei Monitoren oder Laserdruckern [Ric96].

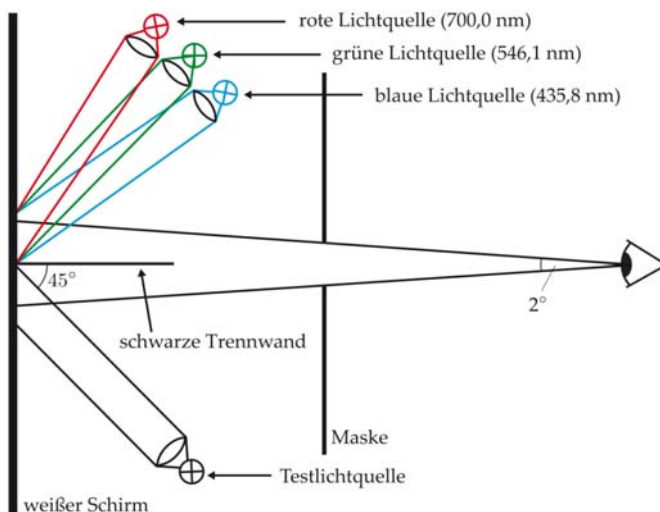


Bild 2.15: Farbmessexperiment zur Ermittlung der Farbwerte der CIE. [Bey12]

Aufgrund der Art der Farbbeschreibung hat jeder Farbraum seine eigenen Vorzüge. In Bild 2.16 werden die Farbräume anhand ihrer Anwendung und ihrer technischen oder physiologischen Sichtweise kategorisiert [Bey12]. Entscheidend für die Wahl des Farbraumes bei Untersuchungen ist die Farbverarbeitung der Messmethode. Zu berücksichtigen ist neben der Durchführung der Messung auch die Auswertung.

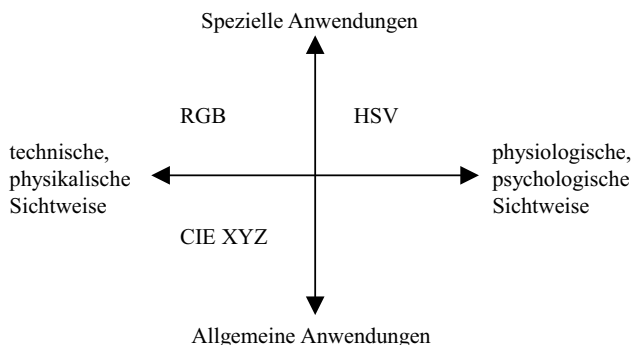


Bild 2.16: Einteilung der beschriebenen Farbräume. Nach [Bey12]

Bei einigen Messmethoden ist es sinnvoll, die Farben zu abstrahieren und in Grautöne umzuwandeln. Entscheidend sind die Objekteigenschaften, die untersucht werden. Die

Umwandlung der Farbwerte des RGB-Farbraumes in Grauwerte erfolgt anhand der subjektiven Farbwahrnehmung und berechnet sich nach [Bey12] durch:

$$gw = 0,299 \cdot ro + 0,587 \cdot gr + 0,114 \cdot bl \quad (2.1)$$

mit

gw	Grauwert
ro	Rotanteil des RGB-Farbwertes
gr	Grünanteil des RGB-Farbwertes
bl	Blauanteil des RGB-Farbwertes

Es kann jedoch sinnvoll sein nur ein Merkmal des gewählten Farbraumes in Grauwerte zu überführen, um eine Verstärkung der relevanten Objekteigenschaft zu erreichen. Ist beispielsweise die Sättigung der Farben von Bedeutung, kann nur das Merkmal S des HSV-Farbraumes in ein Grauwertbild überführt werden. [Neu05]; [Gon14]; [Bey12]

Histogramme zur Bildanalyse

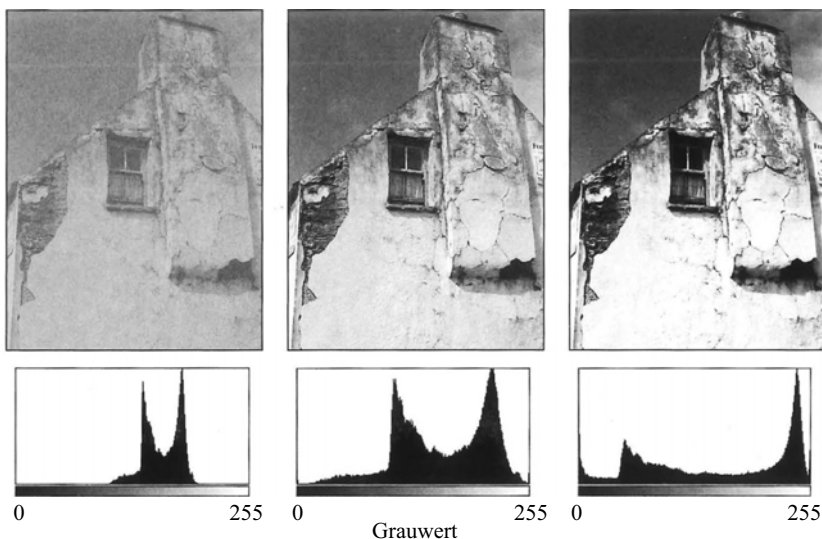


Bild 2.17: Auswirkungen von Kontraständerungen auf ein Histogramm: niedriger Kontrast (li.), normaler Kontrast (mi.), hoher Kontrast (re.). angepasst aus [Bur09]

Histogramme sind die grafische Darstellung der Bildpixel und des Merkmals der Farbtöne bzw. Grautöne. Im Histogramm wird die Anzahl der Bildpixel eines Farbwertes gegenüber dem Farbwert selbst aufgetragen. Ein kontrastarmes Bild besitzt ein enges Histogramm,

während ein kontrastreiches Bild ein weites Histogramm vorweist (siehe Bild 2.17). Maxima im Histogramm sind dominante Farbwerte im Bild. Da nur eine Auswahl eines Merkmals des Bildes im Histogramm aufgegriffen wird, ist dies bei der Interpretation der Histogramme zu berücksichtigen. Beispielsweise sind in Bild 2.18 drei Bilder dargestellt, die identische Histogramme aufweisen. [Gon14]; [Bur09]; [Jai95]

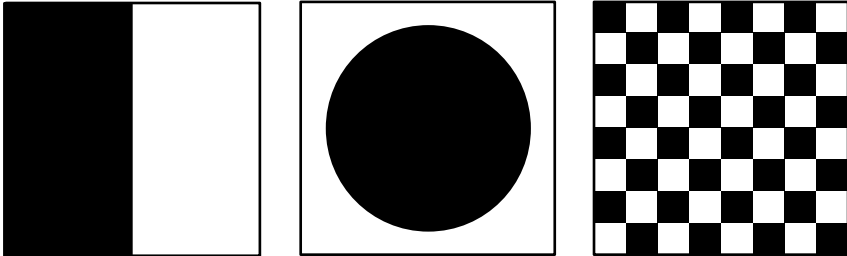


Bild 2.18: Drei verschiedene Bilder mit identischen Histogrammen. Nach [Bur09]

3 Die echtzeitfähige Prüfmethode und ihre Zielsetzung

Das ideale DES ermöglicht es, PSM in reiner Form bedarfsgerecht zur Trägerflüssigkeit hinzuzugeben und zu applizieren. Dabei können die Wirkstoffe genau richtig dosiert an der Stelle der landwirtschaftlichen Fläche ausgebracht werden, wo diese gebraucht werden und nicht präventiv auf dem gesamten Schlag. Das bedeutet, das DES muss mit den Formulierungen der PSM umgehen können und schnell arbeiten, um auf sensorisch erfasste Veränderungen reagieren zu können. Daneben darf es, der breiten Nutzbarkeit wegen, keine Funktionsbeschränkungen gegenüber der konventionellen Pflanzenschutztechnik beinhalten.

In den vergangenen Jahren wurden funktionsfähige DES vorgestellt. Wird die Frage verfolgt, warum diese Systeme sich nicht auf dem Markt etablieren konnten, stellt sich heraus, dass jedes System nur eine Auswahl der Anforderungen an DES erfüllen konnte. Beispielsweise wird die Varianz der PSM in der Systemauslegung noch nicht ausreichend berücksichtigt. So sind fest formulierte PSM in den meisten Systemen ausgeschlossen. Auch wird die Aufwandmengenbreite eingeschränkt. Die Zuverlässigkeit, dass das DES die PSM mit Wasser gut vermischt und keine Konzentrationsschwankungen bei der Applikation auftreten, kann vom Entwickler noch vom Anwender aufgrund der Variantenvielfalt von PSM und der Vielfalt der chemischen und physikalischen Eigenschaften nur schwer eingeschätzt werden.

Der Rührwerkstest (siehe Kapitel 2.2.2) liefert eine Aussage über die Mischqualität der Spritzbrühe bei Verwendung des maschineninternen Rührwerks. Als PSM-Vergleichsprodukt wird eine 1 % Suspension aus Kupferoxychlorid und einer Flüssigkeit verwendet. Diese ist kein zugelassenes Pflanzenschutzmittel, ist aber bei der Untersuchung von Pflanzenschutzsystemen auch keine einfache Flüssigkeit, da nach dem Beenden der Tests das Kupferoxychlorid aufgefangen, eingetrocknet und aufwändig entsorgt werden muss. Die entnommenen Proben werden ebenfalls eingetrocknet und gravimetrisch untersucht, um Konzentrationsschwankungen des Kupfers festzustellen. Diese Untersuchung ist aufwendig und benötigt eine dafür vorgesehene Prüfanlage mit der notwendigen Auswertungsvorrichtung. Für viele Hersteller stellt dies also keine praktikable Erprobungsmöglichkeit in der Vorentwicklungsphase eines Pflanzenschutzsystems dar, in der mehrere technische Varianten untersucht werden sollen. Andere Prüfungen nutzen eine Flüssigkeit mit fluoreszierenden Tracern und viskosen Hilfsstoffen, die ein PSM darstellen. Sie sind umweltverträglicher als PSM und ermöglichen es, eine Erprobung ohne Laborbedingungen oder außerhalb der Pflanzenschutzmaßnahmen im landwirtschaftlichen Betrieb durchzuführen. Für ihre Auswertung sind Messeinrichtungen notwendig, die in ihrer Anschaffung teuer sind. Eine solche zeitaufwendige Messung liefert direkt während der Erprobung keine Ergebnisse. Für Hersteller von neuen DES stellt sich der Einsatz dieser Prüfmethode zur Erprobung von Funktionsmustern ebenfalls als nicht praktikabel dar.

Nach aktueller Kenntnis werden Prüfungen zur Untersuchung der Mischqualität von Pflanzenschutzsystemen, speziell DES, im Entwicklungsstand der Funktionsmuster nur rudimentär durchgeführt. Erprobungen erfolgen frühestens im Prototypenstatus. Das kann zu ungewollten Entwicklungsschleifen führen. Lösungen zur Beschleunigung des Entwicklungsprozesses liefern vorab durchgeführte Simulationen. Gerade für den Mischprozess von PSM und Wasser an Einspeisestellen können CFD-Strömungssimulationen (Computational Fluid Dynamics) eingesetzt werden. Dennoch ersetzen sie die Erprobungen der Maschinen nicht.

Es ist also dringend notwendig, gerade die Dosier-, Misch- und Verteilvorgänge im DES effizient prüfen zu können. Dies erfordert die Möglichkeit einer einfachen und schnellen Qualitätsuntersuchung. Aus anderen Fachbereichen sind optische Prüfverfahren zur Qualitätssicherung bekannt. Sie nutzen die Bildverarbeitungstechnik zur zerstörungsfreien Materialprüfung. Diese optischen Prüfungen werden zur Untersuchung von Pflanzenschutzsystemen noch nicht eingesetzt. Sie eignen sich durch ihren geringen Aufwand auch für die Funktionsmusterprüfung.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, eine echtzeitfähige Prüfmethode (EPM) zur Untersuchung der Mischqualität in Pflanzenschutzsystemen zu konzipieren und eine Funktionsabschätzung vorzunehmen. Die Methode nutzt die optische Prüfung und die Bildverarbeitung für den Prozess der Auswertung. Die EPM kann die Mischqualität von einem PSM-Vergleichsprodukt und einem Tracer mit Wasser ermitteln und so ein hilfreiches Werkzeug für die variantenreiche Prozesserprobung in frühen Entwicklungsphasen sein. Wesentliche Eigenschaften der EPM sind:

- Direkte Vorlage des Prüfergebnisses durch die echtzeitfähige Auswertung.
- Verwendung von weitverbreiteten und kostengünstigen Systemen zur Bildaufnahme und -auswertung.
- Mobile, ortsunabhängige Einsatzfähigkeit.
- Erfassung von umweltverträglichen und entsorgungsfreundlichen, PSM-nahen Prüfstoffen.

Die zerstörungsfreie Materialprüfung zeigt, dass es möglich ist, Materialzustände ohne Veränderung der Zustände in Echtzeit zu erfassen und auszuwerten. Gerade bei Prüfsituationen mit Flüssigkeiten ist es hilfreich, nicht in das Prozessmedium selbst einzugreifen. Daher ist eine Sichtprüfung für die Untersuchung der Mischqualität bei Pflanzenschutzspritzen eine sinnvolle Prüfmöglichkeit. Die EPM greift Teillösungen der automatischen Sichtprüfung auf, die anhand ihrer Auswirkungen auf den Untersuchungsprozess sinnvoll angewendet werden können.

Motivationen für die Entwicklung von DES sind unter anderem die ökologische Verbesserung der Pflanzenschutzmaßnahmen und die Erhöhung der Nutzerfreundlichkeit für zusätzliche Freiheitsgrade bei der Applikation. Diese Anforderungen sind ebenfalls auf die EPM zu übertragen. Sie soll die Prüfungen von Pflanzenschutzsystemen umweltgerecht und nutzerfreundlich durchführen. Dementsprechend werden die ISO-Normen zur Prüfung von Pflanzenschutzsystemen herangezogen, um ein PSM-Vergleichsprodukt auszuwählen und einen legitimen Versuchsstoff für die EPM zu identifizieren. Damit entfällt die aufwendige Entsorgung der Versuchsstoffe von konventionellen Prüfungen und die Umweltverträglichkeit des eingesetzten PSM-Vergleichsproduktes ist gegeben.

Die Erhöhung der Nutzerfreundlichkeit ist durch eine rechnergestützte Auswertung der Sichtprüfung zu erreichen. Das für Forschungszwecke häufig genutzte Programm MATLAB von MATHWORKS wird verwendet, um einen echtzeitfähigen Algorithmus bereitzustellen, der dem Benutzer das Prüfungsergebnis direkt vorlegt. In diesem werden Erkenntnisse aus der Bildverarbeitung und –auswertung genutzt. Abgestimmt auf den Untersuchungsfall werden durch den Algorithmus Bildmanipulationen durchgeführt. Diese Maßnahmen sind in der wissenschaftlichen Bildverarbeitung zulässig und werden auf die EPM übertragen. Des Weiteren ist der Benutzer durch eine einfache Anwendung der Prüfmethode zu unterstützen. Die Ausarbeitung einer kompakten und mobilen Prüfeinrichtung in dieser Arbeit dient dem Anwender die EPM schnell und intuitiv einsetzen zu können.

Um die Eignung der EPM für die Prüfung von Pflanzenschutzsystemen zu bestätigen, wird eine Fehlerbetrachtung und Genauigkeitsabschätzung auf die eingesetzten Prüfmethode angewendet. Die Betrachtung der Verfahrensweisen wird nach DIN 1319-3 durchgeführt. Die EPM wird einer konventionellen Prüfmethode gegenübergestellt, um für die Prüfungen von Pflanzenschutzsystemen legitimiert zu werden.

4 Untersuchung der Mischqualität in Versuch und Auswertung

Die Versuche werden so aufgebaut, dass die Mischqualität einer in der Praxis eingesetzten Vormischung eines PSM in Wasser, also einer konzentrierten Brühe, simuliert wird und untersucht werden kann. Da der konzentrierte, reine Wirkstoff in Wasser die kritischste Vermischungssituation darstellt, werden die Versuchsflüssigkeiten auf das Extremszenario der PSM abgestimmt, um eine Funktionsabschätzung der echtzeitfähigen Prüfmethode (EPM) durchzuführen. Nachfolgend ist der Versuchsaufbau zur Erzeugung der Mischqualität einer nachgebildeten Vormischung beschrieben. Ausgehend von den ausgewählten Versuchsstoffen wird außerdem die Versuchsdurchführung erläutert. Abschließend sind die genutzten Auswertungsmethoden aufgeführt.

4.1 Eingesetzte Prüfstoffe

Zur Abbildung der PSM im Versuch wird ein PSM-Vergleichsprodukt benötigt, das die Eigenschaften der PSM bestmöglich abbilden kann, gesundheitlich unbedenklich ist und einen geringen Entsorgungsaufwand besitzt. Für Prüfungen von Reinigungseinrichtungen der Pflanzenschutzspritzen wird ein viskoser Hilfsstoff, der in ISO 21278 Anhang B aufgeführt ist (siehe Kapitel 2.2.2) genutzt. Ein weiterer viskoser Hilfsstoff wird im British Standard (BS) 6356 beschrieben [BS96]. Nach der Gegenüberstellung der beiden Prüfstoffe (Tabelle 4.1), ist zu erkennen, dass Polysaccharide auf Xanthan-Basis den zweithöchsten Bestandteil neben Wasser bilden.

Tabelle 4.1: Vergleich von viskosen Hilfsstoffen aus [ISO08] und [BS96]

Bestandteil	Masseanteil nach ISO 21278 [%]	Masseanteil nach BS 6356 [%]
Polysaccharide (auf Xanthan-Basis)	0,7	1,0
Methylcellulose	0,3	0,3
Soda	0,2	-
Antibakterielles Konservierungsmittel	0,1	-
Wasser	98,6	98,6
Tracer	0,1	0,1

Xanthan wird vielen Lebensmitteln als Verdickungsmittel hinzugefügt. Es zählt zu den modifizierten Stärken und hat gegenüber nativen Stärken (z. B. Kartoffelstärke) einige veränderte Eigenschaften. Es besitzt eine bessere Alterungsstabilität, eine verzögerte Quellung und eine erhöhte Widerstandsfähigkeit gegenüber Scherkräften. Außerdem gewährleistet es die Gefrier- und Auftaufestigkeit von Emulsionen [Bal07]. Schon geringe Mengen sorgen in einer Flüssigkeit für eine Viskositätssteigerung. Während die dynamische Viskosität des newtonschen Fluids Wasser ungefähr konstant 1 mPa·s (20°C) beträgt, ist die dynamische Viskosität des Hilfsstoffes aus BS 6356 gegenüber unterschiedlichen Scherraten in Bild 4.1 aufgezeichnet. Die Scherrate oder auch Schergeschwindigkeit ist definiert als Geschwindigkeit bezogen auf den Plattenabstand im Plattenmodell (vgl. zweites Newton'sches Gesetz). Bei zunehmender, aufgebrachter Scherkraft nimmt die Viskosität des Hilfsstoffes ab. Der Hilfsstoff verhält sich scherverdünnend [Esc93].

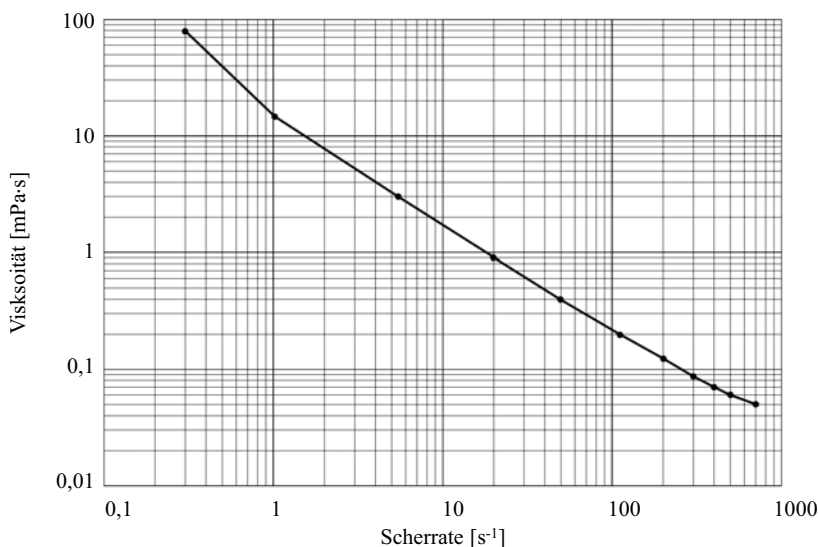


Bild 4.1: Verhalten der dynamischen Viskosität des viskosen Hilfsstoffes bei unterschiedlichen Scherraten aus BS 6356. [BS96]

Weiterhin wird beiden viskosen Hilfsstoffen Methylcellulose hinzugegeben. Sie ist beispielsweise der Hauptbestandteil von Tapetenkleister. Das chemisch hergestellte Verdickungsmittel löst sich im kalten Wasser wesentlich besser als im warmen Wasser. Bei hohen Temperaturen kann die Methylcellulose ausfallen und kann somit als Hitzetracer für Prüfungen im Flüssigkeitskreislauf von Pflanzenschutzspritzen dienen.

Da im abgebildeten Vormischprozess der Versuchsanlage keine Hitzeinwirkungen erfasst werden, wird die Methylcellulose dem gewählten PSM-Vergleichsprodukt nicht hinzugesetzt. Um ein einfaches, leicht herstellbares PSM-Vergleichsprodukt abzubilden, sind daher Wasser, Xanthan und ein Tracer miteinander vermengt. In den Versuchen werden damit PSM mit unterschiedlicher dynamischer Viskosität nachgestellt. Um die Bandbreite der eingesetzten PSM abzudecken (siehe Kapitel 2.1.2) und unterschiedliche Mischungsfälle zu erzeugen, werden PSM mit einer dynamischen Viskosität von 120 und 600 mPa·s bei einer Scherrate von 100 s^{-1} simuliert. Durch Vorversuche lässt sich der notwendige Masseanteil des Xanthans ermitteln, um die bestimmte Viskosität des PSM-Vergleichsproduktes zu erreichen. Die Berechnung basiert auf durchgeführten, rheologischen Messungen mit unterschiedlichen Masseanteilen des Xanthans (siehe Bild 4.2).

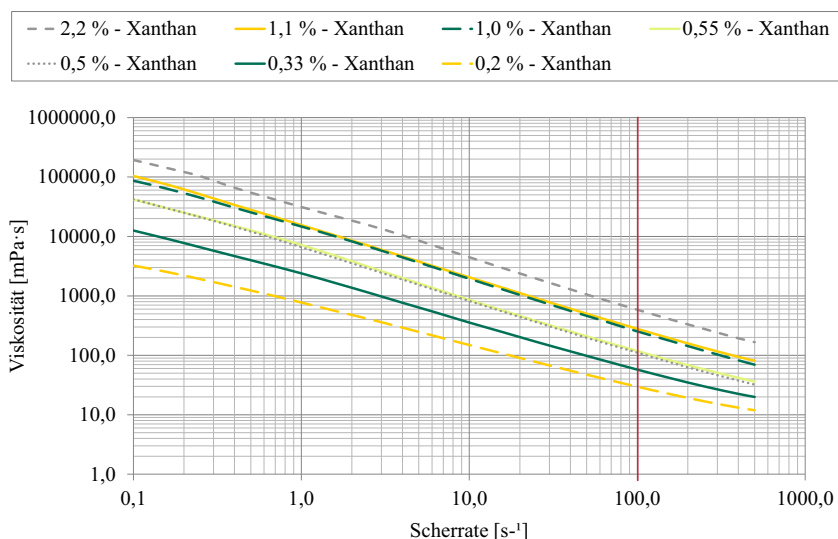


Bild 4.2: Verhalten der dynamischen Viskosität bei unterschiedlichen Scherraten von PSM-Vergleichsprodukten aus Wasser und Xanthan mit unterschiedlichen Masseanteilen bei 20°C .

Weitere Vergleichsmessungen belegen, dass das Viskositätsverhalten des PSM-Vergleichsproduktes von notwendigen stofflichen Veränderungen als unabhängig angenommen werden kann. Wird ein Tracer hinzugemischt oder die Versuchsprobe eingefroren und wieder aufgetaut, hat dies vernachlässigbare Einflüsse auf die dynamische Viskosität (siehe Bild 4.3). Die relativen Abweichungen der gemessenen dynamischen Viskosität der verschiedenen behandelten Proben vom Mittelwert liegen bei max. $\pm 0,06 \%$. Für das verwendete Rheometer KINEXUS PRO+ ist eine Messunsicherheit von $\pm 0,17 \%$ im

Viskositätsbereich von 180 bis 520 mPa·s und $\pm 0,19\%$ im Viskositätsbereich von 520 bis 1000 mPa·s angegeben. Die Messabweichung der gemessenen dynamischen Viskosität befindet sich innerhalb eines Vertrauensniveaus von 95 %.

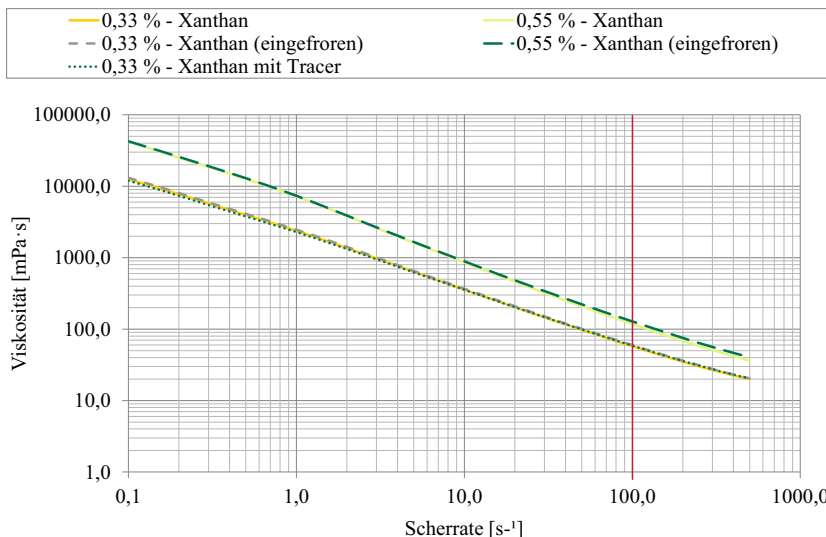


Bild 4.3: Abschätzung der Einflüsse auf das Verhalten der dynamischen Viskosität bei unterschiedlichen Scherraten von unterschiedlich behandelten PSM-Vergleichsprodukten und PSM-Vergleichsprodukten mit zusätzlichen Komponenten bei 20°C.

Als Tracer können verschiedene Stoffe verwendet werden. Bei Prüfungen von Pflanzenschutzspritzen werden beispielsweise Lebensmittelfarben wie auch fluoreszierende Farbstoffe eingesetzt. Fluoreszierende Farbstoffe haben den Vorteil, dass sie auch in geringen Mengen optisch gut erfassbar sind. Durch die Eigenschaften der Fluoreszenz wirkt der Farbstoff wie eine eigene Lichtquelle. Er emittiert mehr Licht in bestimmten Wellenlängenbereichen als von der Lichtquelle erzeugt wird. Ist der Masseanteil eines Farbstoffes zu hoch, führt dies zur Abdeckung der Fluoreszenz. D. h. das emittierte Licht eines Farbpigmentes wird von den umgebenden Farbpigmenten aufgenommen und zurückgegeben, sodass nur einzelne Lichtphotonen nach außen dringen. Liegt der richtige Masseanteil vor, ist der fluoreszierende Farbstoff in einer Aufnahme leicht zu lokalisieren. Eine Ausleuchtung mit breitem Lichtspektrum im Bereich der Fluoreszenzanregung wird bei Untersuchungen mit diesen Farbstoffen verwendet [Bey12]. Bei der Nutzung von Lebensmittelfarbe ist der Farbstoff dagegen weniger gut sichtbar. Er reflektiert nur das Lichtspektrum seiner eigenen Farbe. Dadurch stehen weniger Lichtphotonen zur Erzeugung

der Bildaufnahmen zur Verfügung als bei fluoreszierenden Farbstoffen. Für eine gute optische Sichtbarkeit wird daher ein fluoreszierender Farbstoff gewählt.

In den Prüfungen des JKI werden üblicherweise Pyranin und BSF verwendet. Nach Einschätzungen des JKI ist Pyranin weniger UV-stabil, aber kostengünstiger als BSF. Aufgrund der Versuchsumgebung und der möglichen Einwirkung von Tageslicht, wird der UV-stabilere Farbstoff BSF gewählt. Abschätzungsversuche haben gezeigt, dass die Fluoreszenz des BSF intensiv ist, wenn 0,1 ppm BSF in der Versuchsflüssigkeit vorliegen.

4.2 Versuche zur optischen Qualitätserfassung

4.2.1 Übertragung anderer Prüfanordnungen auf den Versuchsaufbau

Die Vorgehensweise zur Bildaufnahme ist entscheidend für die Leistungsfähigkeit eines automatischen Prüfsystems. Dabei sind die angepasste Beleuchtung an die zu untersuchende Eigenschaft, die Anordnung und die Wahl der Kamera sowie die Wahl des Bildausschnittes und ähnliche Stellgrößen maßgebend.

Bei der Planung von optischen Messeinrichtungen können Erfahrungen aus bestehenden, optischen Mess- und Prüfverfahren berücksichtigt werden. Hieraus sind individuelle, dem zu prüfenden Kriterium angepasste Messaufbauten und die Auswahl von Geräten herzuleiten [Bre93]. Nachfolgend sind Eigenschaften von Aufbauanordnungen und Durchführungen verschiedener optischer Prüfverfahren mit Bezug zur Problemstellung aufgeführt. Im Aufbau der Versuchseinheit der EPM sind diese Anordnungen zu berücksichtigen und anzuwenden.

Im Untersuchungsfall der EPM liegt eine teiltransparente und inhomogene Versuchsflüssigkeit vor. Da die Flüssigkeit im System einer Pflanzenschutzspritze untersucht wird, befindet sie sich theoretisch zum Zeitpunkt der Untersuchung gesammelt in einem Behälter oder in einer Leitung. Zur externen, optischen Erfassung des Fluoreszenzspektrums von BSF ist daher ein durchsichtiger Untersuchungsraum gewählt. Dadurch ergeben sich Reflexionsflächen, die möglichst durch die sinnvoll gewählte Beleuchtung zu eliminieren sind.

Ein möglicher Beleuchtungsaufbau der automatischen Sichtprüfung ist die Hellfeldbeleuchtung. Bei ihr wird das Licht direkt in die Kamera gelenkt. Eine koaxiale Ausleuchtung des Untersuchungsobjektes ist für undurchlässige Materialien sinnvoll, um Vertiefungen schattenfrei auszuleuchten. Die Lichtquelle kann aber auch hinter dem Prüfobjekt liegen und direkt in die Kamera gerichtet sein. Das Objekt verursacht durch diese Anordnung einen Schattenwurf. Es können Defekte erkannt werden, die sich auf den Umriss des Objektes auswirken. [Bey12]

Bildet eine homogene Fläche ein Streulicht oder wird eine flächenhafte Lichtquelle eingesetzt, die einen Untersuchungsraum gleichmäßig aus allen Richtungen beleuchten,

spricht man von einer diffusen Beleuchtung. Das Licht hat keine ausgeprägte Vorzugsrichtung und beleuchtet das Prüfobjekt einheitlich. Entgegen der gerichteten Beleuchtung erzeugt eine diffuse Beleuchtung dementsprechend keinen Schattenwurf des Objektes. Außerdem treten kaum Glanzlichter bei stark reflektierenden Flächen auf. [Bey12]

Im vorliegenden Prüfungsfall der Qualitätsuntersuchung von Mischungszuständen ist eine möglichst einheitliche Ausleuchtung der Versuchsflüssigkeit erwünscht. Der Grad der Homogenität, und damit der Mischungszustand, lässt sich in der inneren Struktur der teiltransparenten Flüssigkeit erkennen. Ein Schattenwurf der inneren Zustände ist demnach sinnvoll und durch eine gleichmäßige und diffuse Hintergrundbeleuchtung zu erzeugen. Gleichzeitig hat sie den Vorteil, dass kaum Reflexionen auf den Behälteroberflächen entstehen. Die in Bild 4.4 dargestellte Durchlichtinspektion dient als Vorlage für den Versuchsaufbau, der in Kapitel 4.2.2 vorgestellt ist.

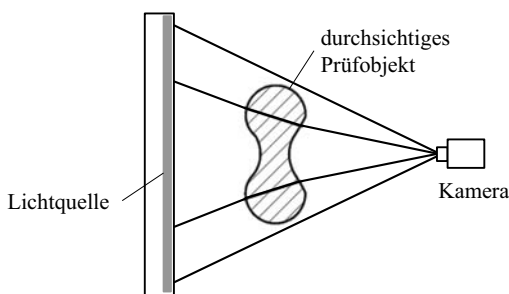


Bild 4.4: Durchlichtinspektion transparenter oder teiltransparenter Objekte mit variabler Hintergrundbeleuchtung. [Bey12]

Ein weiteres Kriterium für die optimale Beleuchtung des Prüfobjektes ist die Fremdlichteinwirkung. Je besser die Fremdlichteinflüsse der Umgebung unterdrückt werden, desto leichter ist die nachgelagerte Bildverarbeitung bzw. –manipulation. Dies trägt wesentlich zu einer gesteigerten Ergebnisqualität und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei. Eine Fremdlichteinwirkung ist beispielsweise die Sonnenlichteinstrahlung. Sie kann zu einer Überbelichtung oder einem ungewollten Schattenwurf beitragen. Maßnahmen zur Unterdrückung des Fremdlichtes können sein [Bey12]:

- Abdunklung des Aufbaus
- Großer Störabstand durch aktive, intensive Beleuchtung
- Schmalbandige Beleuchtung und optische Filter
- Referenzaufnahmen des Störlichteinflusses zur Verarbeitung im weiteren Bildauswertungsprozess

Für den Versuchsaufbau der EPM sind drei Maßnahmen zur Fremdlichtunterdrückung getroffen. Zum einen ist der maßgebliche Raum zur Bildaufnahme lichtdicht aufgebaut und zum anderen ist mit der gewählten Beleuchtungsart ein großer Störabstand gegeben. Des Weiteren wird im Vorfeld eines Versuches eine Referenzaufnahme erstellt.

4.2.2 Versuchsaufbau der Methode zur optischen Qualitätsuntersuchung

Zur Fluoreszenzanregung des gewählten Tracers BSF ist eine flächige Lichtquelle mit UV-Licht gewählt, die aus UV-LED-Bändern hergestellt wurde. Die verwendete LED besitzt einen Leuchtwinkel von 120° und die Bänder werden in einem Abstand von 17 mm angebracht. Für eine ausreichende Überdeckung der Lichtkegel benachbarter LED ist der Diffusor im Abstand von 47 mm zur LED-Platte aufgestellt. Am Diffusor liegt eine vollständige Flächenausleuchtung an. Zur Reduktion der Fremdlichteinflüsse ist der Bereich der Bildaufnahme lichtdicht abgehängt. Hier ist eine handelsübliche, schwarze Teichfolie mit einer Dicke von 0,5 mm verwendet.

Der Behälter, in dem die Versuchsflüssigkeit zum Zeitpunkt der Bildaufnahme vorliegt, wird nachfolgend als Auffangtank bezeichnet. Dieser zeichnet sich durch eine einheitliche Schichtdicke von 100 mm über seine gesamte Breite und Höhe aus. Der Tank besteht aus farblosem Plexiglas, wodurch er in allen Richtungen lichtdurchlässig ausgeführt ist.

Zur Bildaufnahme wird eine Spiegelreflexkamera EOS 600D von CANON verwendet. Sie speichert die Bilddaten als RAW-Dateien ab. Dies sorgt für eine sehr hohe Auflösung der Farbwerte und ermöglicht eine differenzierte Bildmanipulation. Die Manipulation und Auswertung sind im Anschluss der Versuche mit MATLAB durchgeführt.

Der Aufbau des Versuchstandes ist in Bild 4.5 schematisch aufgezeichnet. Unmittelbar vor der Versuchsdurchführung wird das PSM-Vergleichsprodukt im vorgesehenen Behälter der Versuchsanlage bevorratet. Zur Förderung vom Wasser sowie dem PSM-Vergleichsprodukt kommen Pumpen zum Einsatz deren Volumenstrom regelbar ist. Sie fördern eine eingestellte Aufwandmenge (AWM) der Flüssigkeiten. Der Injektor führt die Flüssigkeiten zusammen und bildet die Versuchsflüssigkeit aus. Liegt sie im Auffangtank vor, werden Bilder von dieser mit der Kamera aufgenommen. Sie sind die Grundlage der Bildauswertung des jeweiligen Versuches. Die ersten Versuche haben gezeigt, dass anschließend sechs Proben je 20 ml an festgelegten Stellen im Auffangtank zu entnehmen sind. Die Proben sind zur konventionellen Untersuchung der Durchmischung der Versuchsflüssigkeit zu verwenden. Der Rest der Flüssigkeit wird abgelassen und entsorgt. Der Versuchsaufbau wird so gesäubert, dass keine Rückstände der Versuchsflüssigkeit vorhanden sind, um Einflüsse auf nachfolgende Versuche zu eliminieren.

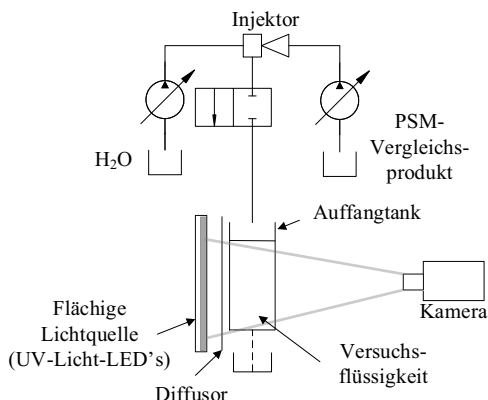


Bild 4.5: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. [Mar18]

4.2.3 Durchführung von Versuchen mit unterschiedlicher Mischqualität

Zur Herstellung des PSM-Vergleichsproduktes sind zunächst die Masseanteile der Inhaltsstoffe zu berechnen, um die gewünschte dynamische Viskosität einzustellen (siehe Kapitel 4.1). Anschließend werden die Mengen ausgewogen und außerhalb des Versuchsaufbaus zum PSM-Vergleichsprodukt angerührt. Durch die folgende Ruhephase quellt das Xanthan im Wasser auf und die dynamische Viskosität des PSM-Vergleichsproduktes entsteht.

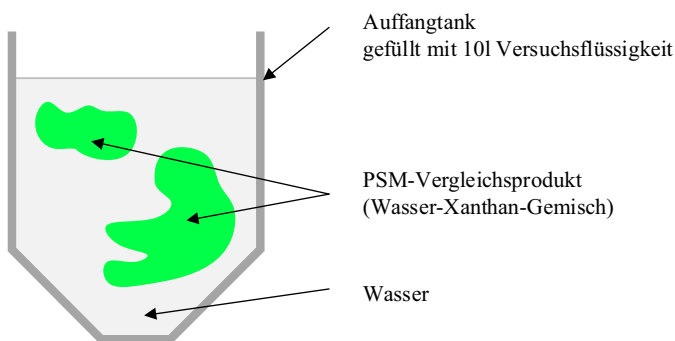


Bild 4.6: Zusammensetzung der unterschiedlichen Flüssigkeiten im Versuch.

Im Versuch werden immer so viel Wasser und PSM-Vergleichsprodukt zusammen gebracht, dass 10 l Versuchsflüssigkeit im Auffangtank vorliegen (siehe Bild 4.6). Da die

Versuchsflüssigkeit eine Vormischung zwischen Wasser und PSM in der Praxis abbildet, wird die AWM der Versuchsflüssigkeit auf 10 l/ha festgelegt. Zum Zeitpunkt der Bildaufnahme befinden sich immer 0,1 g Tracer im Auffängtank. Durch die Verknüpfung zwischen der AWM des PSM-Vergleichsproduktes und der Voraussetzung, dass sich ein Volumen von 10 l Versuchsflüssigkeit für die Bildaufnahme im Auffängtank befinden, ist die Beigabemenge des Tracers BSF in das PSM-Vergleichsprodukt trotz verschiedener AWM des Produktes immer 0,1 g (siehe Tabelle 4.2). Werden die Mengenvorgaben nicht eingehalten und es liegt zu viel BSF im Versuch vor, führt dies zur Hemmung seiner fluoreszierenden Eigenschaften. Eine Verdunklung der Aufnahme ist die Folge und es kann dazu kommen, dass keine Fluoreszenz mehr sichtbar ist. Liegt dagegen wesentlich weniger Farbstoff vor, kann nicht gewährleistet werden, dass jeder Bildausschnitt die gleiche Lichtintensität zur Überprüfung der Mischqualität aufweist.

Tabelle 4.2: Auszug aus dem Versuchsplan zur Simulation verschiedener Mischungszustände.

Reihe	Masseanteil Xanthan [%]	η PSM- Vergleichspro- dukt [mPa·s]	AWM PSM- Vergleichs- produkt [l/ha]	AWM Ver- suchsflüssig- keit [l/ha]	Masseanteil BSF [g]
A	2,2	600	5	10	0,1
B	2,2	600	1,5	10	0,1
C	0,55	120	5	10	0,1
D	0,55	120	1,5	10	0,1

Legende: η - dynamische Viskosität

Innerhalb einer einzelnen Versuchsreihe aus Tabelle 4.2 ist das Ziel, verschiedene Mischungszustände der Versuchsflüssigkeit zu erzeugen (vergleiche Bild 4.7). Durch die Bildaufnahmen der Flüssigkeiten mit ihren Mischungszuständen wird die EPM auf ihre Ergebnisqualität geprüft. Die Versuche einer Reihe werden daher mit fünfmaliger Wiederholung durchgeführt.



Bild 4.7: Bildaufnahmen von Versuchen der Reihe B mit verschiedenen Mischungszuständen der Versuchsflüssigkeit.

4.3 Methoden zur Analyse und Bewertung der Mischqualität

Nachfolgend wird die EPM für die Auswertung der Versuche herangezogen und in ihrer Verfahrensweise dargestellt. Um die EPM validieren und in ihrer Verfahrensgenauigkeit abschätzen zu können, sind konventionelle Probenuntersuchungen zur Referenzmessung notwendig. Konventionell bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Untersuchungsmethoden zur Erfassung von Konzentrationen wissenschaftlich etabliert sind. Auch die Prüfungen von Pflanzenschutzspritzen nutzen diese konventionellen Methoden, z.B. die Messung der Fluoreszenz. Nachfolgend werden daher neben der EPM die Vorgehensweisen der genutzten konventionellen Messmethoden der Fluoreszenz und der rheologischen Eigenschaften zur Versuchsauswertung beschrieben und angewandt.

Konventionelle Untersuchung durch die Messung der Fluoreszenz und rheologischer Eigenschaften

Nach Entnahme der Proben aus der Versuchsflüssigkeit im Auffangtank werden die Messungen der Fluoreszenz und der rheologischen Eigenschaften durchgeführt. Bei der Messung der Fluoreszenz wird die Konzentration des Tracers BSF berechnet. Die Konzentrationen liefern anschließend eine Aussage über die Qualität der Durchmischung eines Versuches. In Bild 4.8 ist der Prozess der Fluoreszenzmessung in seinen wesentlichen Schritten aufgeführt. Für die Messung wird das Gerät INFINITIE 200 der Firma TECAN verwendet. Das Gerät zählt dafür das emittierte Licht jeder Probe (siehe Kapitel 2.2.3) und gibt einen *fluoreszenscount* aus. Der *fluoreszenscount* ist eine Zählrate, die das emittierte, aufgefangene Licht des BSF beschreibt. Um eine Verbindung zwischen dem *fluoreszenscount* und der Konzentration des BSF herzustellen, ist es essentiell, dass die Proben eines Versuches zusammen mit einer gut gewählten Referenzprobe auf eine Messplatte gegeben werden. Dadurch werden dieselben Messbedingungen für die zusammengehörenden Proben erzeugt. Bei der Messung wird die Probenplatte in den Untersuchungsraum gefahren und von oben mit Licht der Wellenlänge 442 nm angeregt. Vom BSF wird die Emissionswellenlänge 506 nm (± 20 nm) zurückgeworfen. Der Wert des *fluoreszenscounts* wird anschließend anhand der ermittelten Standardkurve der Referenzprobe in die Konzentration des BSF umgerechnet.

Die Wahl der Referenzprobe ist grundlegend für die Genauigkeit der Messung. Die Konzentration der Referenzprobe stellt den Erwartungswert der Konzentration eines Versuches dar. Je näher die BSF-Konzentration der Referenzprobe an den BSF-Konzentrationen der Proben des Versuches liegt, desto geringer ist der Messfehler der BSF-Konzentration der jeweiligen Versuchsprobe. Zeitgleich bedeutet das für schlecht durchmischte Versuchsflüssigkeiten, dass der Messfehler bedingt durch die Spreizung der Probenkonzentrationen in einem Versuch wesentlich größer ist, als bei einem Versuch mit guter Durchmischung.

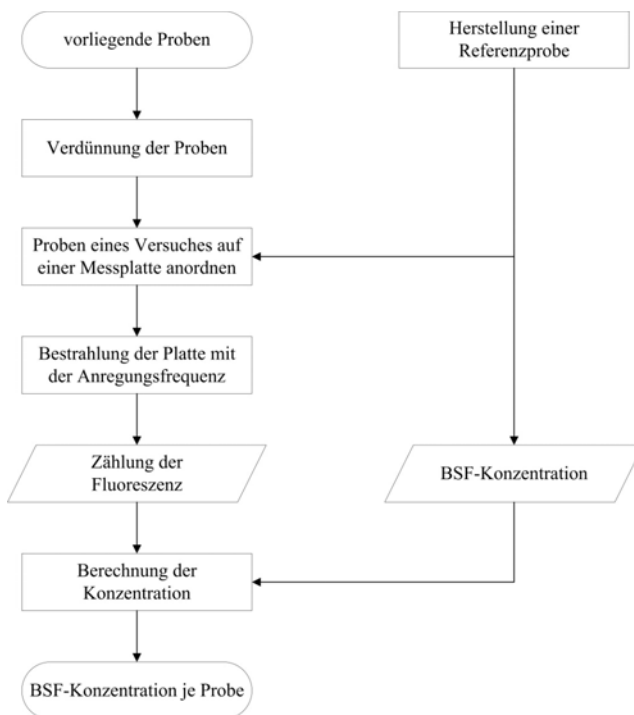


Bild 4.8: Prozess der Fluoreszenzmessung als konventionelle Probenuntersuchung.

Zur Messung der rheologischen Eigenschaften der Versuchsproben wird das Rheometer KINEXUS PRO + der Firma MALVERN verwendet. Der Prozess der Messung ist in Bild 4.9 aufgezeichnet. Die Messgeometrie der coaxialen Zylinder wird mit der einzelnen Versuchsprobe befüllt und eine Messprozedur gestartet. Angewendet wird eine Messprozedur, die verschiedene Schergeschwindigkeiten abfährt und damit in jedem Messpunkt das Fließverhalten der Probe berechnet und aufzeichnet. Als Ergebnis der Messung liegt die Fließkurve der jeweiligen Probe vor. Anhand dieser wird die Viskosität der Probe

ausgegeben. Im direkten Vergleich der Viskosität der Proben eines Versuches wird die Spreizung der Konzentration des Xanthans ermittelt. Dazu werden die bekannten Größen der hergestellten Viskosität des PSM-Vergleichsproduktes und die Viskosität von Wasser hinzugezogen. Abschließend gibt die Spreizung der Konzentration in diesem Messverfahren eine Qualitätseinschätzung der Durchmischung des Versuches.



Bild 4.9: Prozess der Rheologiemessung als konventionelle Probenuntersuchung.

Bildaufnahme und Bildauswertung der EPM

Die Bildaufnahme im Versuch nimmt den gesamten Auffangtank und seine direkte Umgebung auf. Durch Reflexionsflächen des Versuchsaufbaus und die lichtdurchlässigen Behälterwände werden die Randbereiche der im Auffangtank vorliegenden Versuchsflüssigkeit intensiver beleuchtet als das Zentrum der Flüssigkeit. Außerdem ist die räumliche Anordnung des Versuchsaufbaus für die Auswertung der Bildaufnahmen ebenfalls zu berücksichtigen. Aufgrund der Geometrie ist die vorderste Schicht der Versuchsflüssigkeit im Auffangtank größer als die hinterste Schicht an der Rückwand in der Kameraaufnahme. Dies führt in den Bereichen der Seitenwände dazu, dass im Bild eine wesentlich geringere Schichtdicke aufgezeichnet wird, als im Bereich des Bildes, in dem auch die Rückwand zu sehen ist. Mit Hilfe des zweiten Strahlensatzes und den trigonometrischen Funktionen lässt sich die maximale optisch bedingte Verlängerung der Schichtdicke des Auffangtanks in den Aufnahmen berechnen. Sie beträgt 101,993 mm und besitzt damit eine relative

Messabweichung der Schichtdicke von +1,95 %. Für die Bildauswertung ist diese Abweichung als vernachlässigbar angenommen. Die Randbereiche, in denen die optische Schichtdicke des Auffangtanks unter 100 mm fällt, werden in der Bildauswertung nicht berücksichtigt. Bild 4.10 zeigt den betrachteten Untersuchungsraum in der Bildauswertung und den Bildausschnitt, der für die nachfolgenden Fallbeispiele der Durchmischung abgedruckt ist.

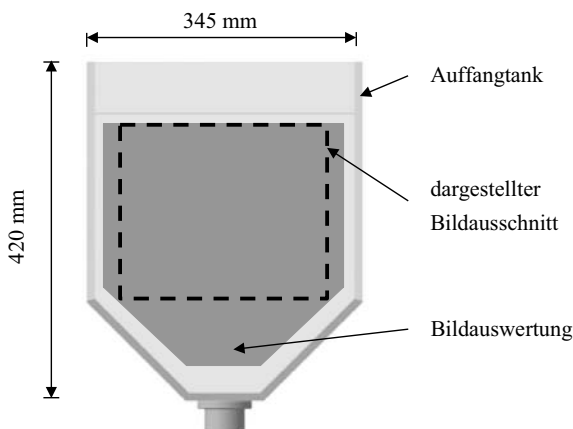


Bild 4.10: Betrachteter Untersuchungsraum der Versuchsflüssigkeit in der Bildauswertung und in dargestellten Bildaufnahmen.

Die Bildaufnahmen der unterschiedlichen Versuchsreihen variieren unter anderem durch ihre Bildhelligkeit. Trotz einem durchgeführten Weißabgleich mit gleichbleibender Farbtemperatur, kommt es zu dunklen Aufnahmen. Diese können in ihren Farbwerten manipuliert werden. Hierzu eignet sich der HSV-Farbraum, da die Helligkeit nur im Farbwert H wieder zu finden ist. Zur Erhellung der Aufnahme und damit höheren Spreizung der relevanten Farbwerte können die Aufnahmen nach [Gon14] wie folgt korrigiert werden:

$$FW_{kor} = \sqrt{-FW^2 + 2 \cdot FW} \quad (0 < FW < 1) \quad (4.1)$$

mit

FW_{kor} korrigierter Farbwert

FW Farbwert

Im vorliegenden Untersuchungsfall hat sich die Bildmanipulation durch Aufhellung nicht bewährt. Helle Bilder werden anhand der Formel (4.1) zwar nur wenig aufgehellt, aber diese Veränderung der Farbwerte reicht aus, dass hier wesentliche Bildinformationen verloren gehen. Da die EPM einen einheitlichen Auswertungsalgorithmus für alle Versuchsreihen nutzt

und durch die Aufhellung nicht alle Versuchsreihen gleichwertig behandelt werden können, wird die Bildmanipulation durch den Abzug der Referenzaufnahme zu einem Differenzbild als ausreichend bewertet.

Das Differenzbild wird durch die Verrechnung der Farbwerte zwischen der Referenzaufnahme und der Versuchsaufnahme erzeugt. Jedes Bildpixel wird einzeln betrachtet und in seinem roten, grünen und blauen Farbwert neu berechnet. Durch eine solche Bildmanipulation entsteht ein Differenzbild des Versuches, in dem die Störeinflüsse der Versuchsanlage reduziert werden.

Bei der Betrachtung von Farbaufnahmen kann die menschliche Wahrnehmung Farben und Farbnuancen unterscheiden. Außerdem können Flächen annähernd gleicher Farbe und Farbkontraste registriert werden. Ein scharfes Bild ermöglicht eine Detailerkennung in der menschlichen Wahrnehmung. Wird eine Aufnahme mathematisch betrachtet, sind informierende Bildgrößen

- die Farbwerte eines Pixels,
- die Veränderung der Farbwerte zwischen benachbarten Pixeln und
- die Anzahl der Bildpixel.

Anhand dieser drei Größen können Bildanalysen durchgeführt werden, die unterschiedliche Aussagen und Rückschlüsse auf das aufgenommene Ereignis geben. Eine Möglichkeit der Analyse ist die Betrachtung der Aufnahme durch ein Histogramm. Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, abstrahieren sie die Aufnahme mit Hilfe einer einfachen Zählung. Rückschlüsse, die aus der Darstellung des Histogramms auf die dazugehörige Versuchsaufnahme geschlossen werden können, sind in Tabelle 4.3 aufgezeigt. Da das Ziel dieser Arbeit die Prüfung der Mischqualität durch die EPM ist, ist bei der Auswertung der Versuche die Histogrammbreite eines Versuchsbildes die ermittelte Größe. Zusätzlich zu der Betrachtung der Informationen aus einem Histogramm ist die Objekterkennung in Tabelle 4.3 ergänzt, da für den Untersuchungsfall der optischen Einschätzung von Mischungszuständen die Erkennung von Anhäufungen des PSM-Vergleichsproduktes hilfreich sein kann. Sie wird in dieser Arbeit allerdings nicht näher betrachtet, sondern lediglich am Ende ausblickend aufgegriffen.




Tabelle 4.3: Möglichkeiten der Identifizierung von Eigenschaften der Bildaufnahmen durch die Betrachtung verschiedener Auswertungsgrößen.

Betrachtungsraum	Bildgröße des Betrachtungsraumes	Analyse-Eigenschaften der Flüssigkeit
Histogrammfläche	Anzahl der Bildpixel	Größe des Untersuchungsraumes
Histogrammbreite	Anzahl der Farbwerte im Bild	Qualitative Durchmischung
Amplitudenhöhe im Histogramm	Anzahl der Pixel mit gleichem Farbwert	Quantitative Durchmischung
Amplitudenlage (x-Achse) im Histogramm	dominanter Farbwert im Bild	Einschätzung der Konzentration des PSM-Vergleichsproduktes
Objekterkennung	scharfer Farbwerteübergang	Lokalisierung von Anhäufungen des PSM-Vergleichsproduktes

Die mathematische Verknüpfung zwischen dem RGB- und dem HSV-Farbraum ermöglicht es, die Versuchsaufnahmen beliebig zu transformieren. Für die Bildauswertung bedeutet das, dass die Ergebnisse sich reproduzierbar in den beiden Farbräumen herstellen lassen. Da die Kamera aufgrund ihrer Farbfilter mit RGB-Farben aufnimmt, ist es sinnvoll, möglichst wenige Umwandlungen von einem Farbraum in einen anderen durchzuführen. Daher wurde im weiteren Verlauf für die Bildauswertung der RGB-Farbraum festgelegt. Zur einheitlichen Verwendung der Farbwerte wird außerdem das Speicherformat von acht Bit gewählt (siehe Kapitel 2.2.3).

Wird der verwendete, fluoreszierende Tracer BSF mit Licht der Wellenlänge von 442 nm angeregt, liegt das emittierte Licht bei einer Wellenlänge von 506 nm (± 20 nm). Die Farbwerte des aufgespannten und aufgenommenen Wellenlängenbereiches sind für den acht Bit-RGB-Farbraum in Tabelle 4.4 aufgelistet.

Tabelle 4.4: Darstellung der emittierten Wellenlängen mit Farbbeschreibung des RGB-Farbraumes

Wellenlänge	Farbton	Farbwerte des RGB-Farbraumes		
		Rot	Grün	Blau
486 nm		0	239	255
506 nm		0	255	70
526 nm		78	255	0

Zu erkennen ist, dass die Farbwerte der relevanten Bereiche der Versuchsaufnahme in allen Farbwerteanteilen Rot, Grün und Blau veränderlich sind. Am meisten variiert der Blauanteil im Bereich von 0 bis 255. In der subjektiven Farbwahrnehmung ist dieser Anteil am aussagekräftigsten zu Erkennung der qualitativen Durchmischung (siehe Bild 4.11). Da jedoch auch der Rot- und Grünanteil der Farbbeschreibung die Durchmischung charakterisiert, sind diese Farbwerte ebenfalls zu berücksichtigen.

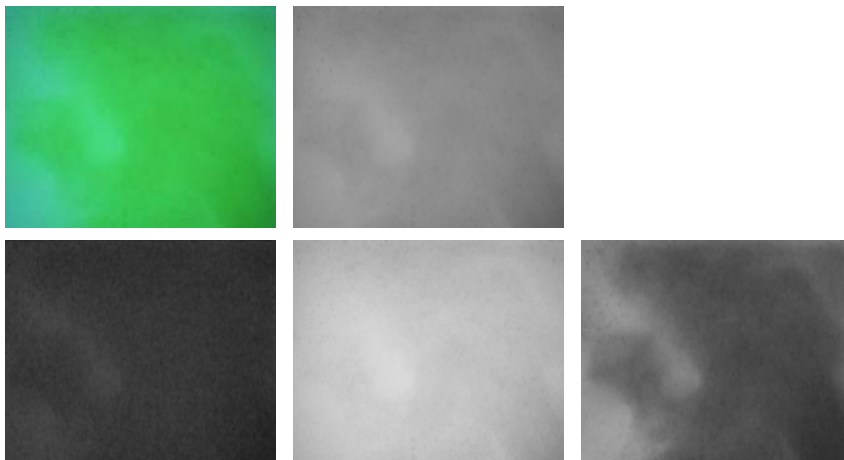


Bild 4.11: Manipulierte Versuchsaufnahmen im Vergleich: Farbwertebild RGB (oben li.); subjektives Grauwertebild (oben mi.); Farbwertebild Rotanteil (unten li.); Farbwertebild Grünanteil (unten mi.); Farbwertebild Blauanteil (unten re.).

Eine Umwandlung in Grauwerte anhand der subjektiven Farbbeschreibung (siehe Kapitel 2.2.3) ist in diesem Untersuchungsfall nicht ausreichend, da die Kontraststärke der qualitativen Durchmischung durch die subjektive Anpassung geglättet wird (siehe Bild 4.11).

Wie auch bei anderen Sichtprüfungen, bei denen Objekte durch ihre Farbe entscheidend charakterisiert werden [Bey12], sind auch hier alle drei Farbwerteanteile mit dem Spektrum der Fluoreszenz vom BSF verknüpft und damit essentiell für die Bildauswertung.

In Bild 4.12 sind die Histogramme zu den Versuchsaufnahmen aus Bild 4.11 abgebildet. Zu erkennen ist, je stärker der Kontrast in einer manipulierten Versuchsaufnahme subjektiv wahrgenommen wird, desto breiter ist das dazugehörige Histogramm. Im RGB-Histogramm sind die roten, grünen und blauen Farbwerte nicht hintereinandergelegt, sondern kumuliert. Ein Pixel in der Aufnahme findet sich dementsprechend dreifach im RGB-Histogramm wieder. In den vier anderen Histogrammen ist jedes Bildpixel lediglich einmal vertreten. Die Flächen dieser vier Histogramme sind also identisch. In Bild 4.12 sind die Histogramme jeweils normiert, sodass der Zusammenhang der Flächen nicht direkt erkennbar ist. Da die Informationsdichte im RGB-Histogramm am größten ist und bei der Analyse alle Farbwerte der Versuchsaufnahmen zu berücksichtigen sind, wird das RGB-Histogramm für die Berechnung der Bildauswertung herangezogen.

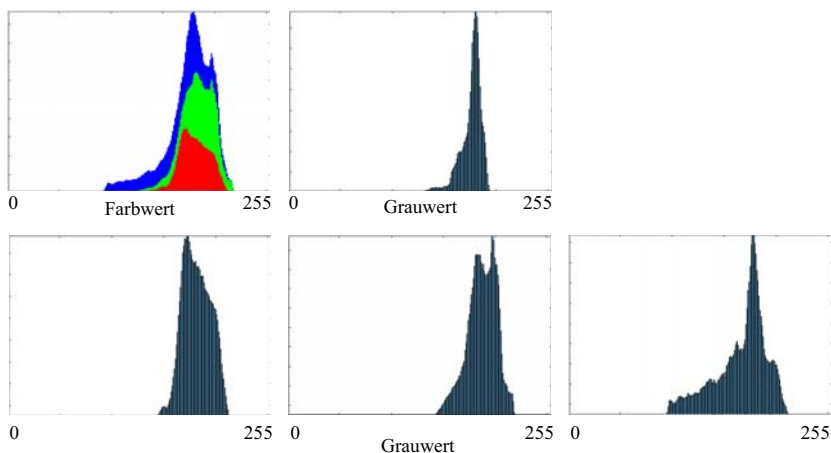


Bild 4.12: Histogramme der manipulierten Versuchsaufnahmen im Vergleich: kumuliertes RGB-Histogramm vom vollständigen Farbwertebild (oben li.); Histogramm vom subjektiven Grauwertebild (oben mi.); Histogramm vom Farbwertebild Rotanteil (unten li.); Histogramm vom Farbwertebild Grünanteil (unten mi.); Histogramm vom Farbwertebild Blauanteil (unten re.).

Bei der Betrachtung der Histogramme ist darauf zu achten, dass der Wertebereich weder nach links (0 – schwarz) noch nach rechts (255 – weiß) aus dem Bildbereich herausläuft. Dieses Verhalten ist ein Indiz für einen Bilddatenverlust von essentiellen Bildinformationen. Auftreten kann es durch den festgelegten, eingeschränkten Betrachtungsraum, z. B. des RGB-

Farbraums oder des gewählten acht Bit-Formates. Für die vorliegenden Versuchsaufnahmen tritt das Herauslaufen im Histogramm nicht auf. Hier ist der Zusammenhang zu den Farbwerten in der Bildaufnahme in Verbindung mit der Ausleuchtung der Versuche zu sehen. Dadurch treten keine dunklen Bildbereiche auf, bei denen Pixel auf den Wert 0 harmonisiert werden. Außerdem liegen durch das eingeschränkte Spektrum und die diffuse Ausleuchtung keine Hellfelder vor, die zu weißen Pixel zusammengefasst werden.

Die Breite der Histogramme, zerlegt in ihren roten, grünen und blauen Anteil, liefert eine mathematisch greifbare Größe zur Identifizierung der Mischqualität. Ein wesentliches Ergebnis dieser Arbeit ist die Definition des universellen Qualitätskriteriums Π . Dieses Qualitätskriterium Π bietet die Möglichkeit als Kennzahl für die Mischqualität verwendet zu werden, um damit einen Vergleich der verschiedenen Pflanzenschutzsysteme greifbar zu machen. Die folgende Gleichung (4.2) wurde mit Hilfe von Messreihen und dem Vergleich zu konventionellen Prüfergebnissen validiert:

$$\Pi = \frac{(R + G + B)}{3 \cdot (b_{\max} - b_{\min})} - \mu \quad (4.2)$$

mit

Π	Qualitätskriterium
R	Breite des Rotanteils im RGB-Farbwertehistogramm
G	Breite des Grünanteils im RGB-Farbwertehistogramm
B	Breite des Blauanteils im RGB-Farbwertehistogramm
b_{\max}	maximale mögliche Breite des Histogramms
b_{\min}	minimale mögliche Breite des Histogramms
μ	Erwartungswert der Breite des Histogramms bei einer idealen Durchmischung

Das Qualitätskriterium Π ist durch die Bildung eines standardisierten Mittelwertes aus den drei Breiten R, G und B der Farbwertehistogramme abzüglich des Erwartungswertes der Breite des Histogramms einer idealen Durchmischung μ definiert. Hier berechnet sich der Mittelwert der Farbwertebreiten R, G und B durch deren Addition und der anschließend Division mit der Anzahl der eingesetzten Werte. Die Berücksichtigung der Differenz aus der maximalen und der minimalen möglichen Breite der Histogramme führt zu der Standardisierung des Mittelwertes. Durch die Bildung der Differenz zwischen diesem Mittelwert und dem Erwartungswert μ wird erreicht, dass das Qualitätskriterium Π beschreibt, um wie viel das Farbwertehistogramm des jeweiligen Versuches vom Idealzustand abweicht.

Um die Grenzwerte für eine gute und eine schlechte Durchmischung der Versuchsflüssigkeit festzulegen, wird die Rührwerksprüfung von Pflanzenschutzspritzen herangezogen (siehe Kapitel 2.2.2). Der Prozessschritt des Rührens von PSM und Wasser in einem Pflanzenschutzspritzsystem ist vergleichbar mit der Mischsituation für die Versuche. Im

Versuch wird eine Vormischung aus PSM und Wasser hergestellt, welche in einem nachgelagerten System zur Applikation der Spritzbrühe weiterverarbeitet würde. Durch die nachfolgende Verarbeitung bis zur Applikation ist es zulässig, im Prozessschritt der Vormischung eine niedrigere, einzuhaltende Mischqualität anzunehmen, als im Prozessschritt der düsen nahen Einspeisung. Die zulässige Abweichung der Messwerte vom Erwartungswert mit $\pm 15 \%$ wird demnach von der Rührwerksprüfung übernommen und auf die EPM bezogen, wodurch der Grenzwert für eine gute Mischqualität validiert werden kann:

$$GW = b_{opt} \cdot (1 + 2P) \quad (4.3)$$

mit

GW Grenzwert für eine gute Mischqualität

b_{opt} standardisierte Breite des Histogramms bei einer optimalen Durchmischung im Versuch
($\hat{=}$ Erwartungswert der Histogrammbreite)

P zulässige Abweichung

Die Vorgehensweise der Methodenabschätzung der EPM ist in Bild 4.13 dargestellt. Der Vergleich zwischen der konventionellen Probenauswertung und den Ergebnissen aus der EPM folgt im Kapitel 5.

Legende:

Π Qualitätskriterium der EPM
GW Grenzwert für eine gute Mischqualität

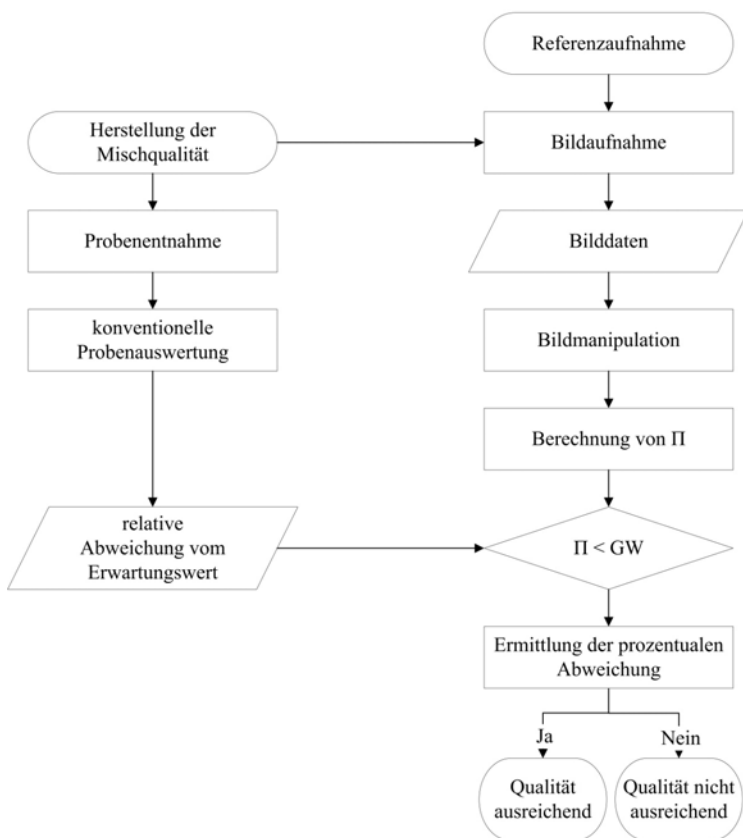


Bild 4.13: Vorgehensweise der EPM im Versuch.

5 Drei Prüfmethoden im Daten- und Ergebnisvergleich

Die mit den gewählten Prüfmethoden Fluoreszenz, Messung rheologischer Eigenschaften und EPM ermittelten Daten werden nachfolgend beispielhaft aufbereitet und vergleichend betrachtet. Um Zusammenhänge zu erkennen, werden Versuche einer der vier vorgestellten Versuchsreihen (siehe Tabelle 4.2) ausgewählt. Daten zu weiteren Versuchen befinden sich ergänzend im Anhang. Die nachfolgende Bezeichnung von Versuchen erfolgt anhand der Reihenbezeichnung A bis D kombiniert mit der Versuchsnummer. Für die Bildauswertung des Versuches wird eine Null an die Bezeichnung angehängen und für verschiedene Proben, die jeweilige Probennummer (siehe Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Nummerierung der Versuche.

Reihe	Masseanteil Xanthan [%]	AWM PSM-Vergleichsprodukt [l/ha]	Versuchsbezeichnung
A	2,2	5	A.010 - A.120
B	2,2	1,5	B.010 - B.280
C	0,55	5	C.010 - C.100
D	0,55	1,5	D.010 - D.040

Jede der Versuchsreihen hat in Bezug auf die Validierung der EPM unterschiedliche Besonderheiten. Zur Untersuchung der Mischqualität der Versuchsflüssigkeit hat sich die Versuchsreihe B als anschaulich erwiesen. Das PSM-Vergleichsprodukt liegt hier mit einer hohen Viskosität vor. Im Zusammenhang mit einer kleineren AWM des PSM-Vergleichsproduktes kann dieses sich bei der Zuführung in den Auffangtank nicht einheitlich mit der großen Menge Wasser mischen. Es entstehen eher schlecht durchmischte Versuchsflüssigkeiten. Zur Validierung der EPM sind diese Versuche am wertvollsten, da die Grenze zwischen einer durchmischten Flüssigkeit und einer nicht durchmischten Flüssigkeit validiert werden kann. Versuchsreihe A stellt den Versuch mit der größten AWM und der größten Viskosität des PSM-Vergleichsproduktes dar. Die Versuchsaufnahmen zu dieser Reihe sind dunkler als die Aufnahmen der anderen Reihen. Zurückgeführt werden kann das auf die Eigenschaften des PSM-Vergleichsproduktes. Dieses ist milchig und hemmt dadurch das Licht bei der Schichtdicke des Auffangtanks von 100 mm. Die Menge der einfallenden Lichtphotonen in die Kamera ist geringer als bei den anderen Versuchsreihen. Gegensätzlich zu der Versuchsreihe A verhält sich Versuchsreihe D. Die Versuchsflüssigkeit ist am lichtdurchlässigsten und bei gleichbleibenden Bildaufnahmeeinstellungen werden viele Lichtphotonen von der Kamera erfasst. Die Bildaufnahmen sind heller als die der anderen

Versuchsreihen. Nachfolgend wird hauptsächlich auf Versuche der Reihe B eingegangen, da für eine Überprüfung der Funktionalität der EPM Versuche mit kritischen Mischungszuständen erforderlich sind.

Die beiden konventionellen Prüfmethoden zur Untersuchung der sechs Versuchsproben, die Messung der dynamischen Viskosität und die Messung der Fluoreszenz, sollen als Referenzmessungen zur EPM genutzt werden. Versuche zeigen jedoch, dass die Messverfahren trotz Auswertung derselben Probe verschiedene Mischungszustände für einen Versuch ermitteln. Für einen Vergleich der Messergebnisse sind in Bild 5.1 einige Ergebnisse aus der Viskositätsmessung von einigen Versuchen aufgeführt und in Bild 5.2 die entsprechenden Ergebnisse aus der Messung der Fluoreszenz derselben Versuche.

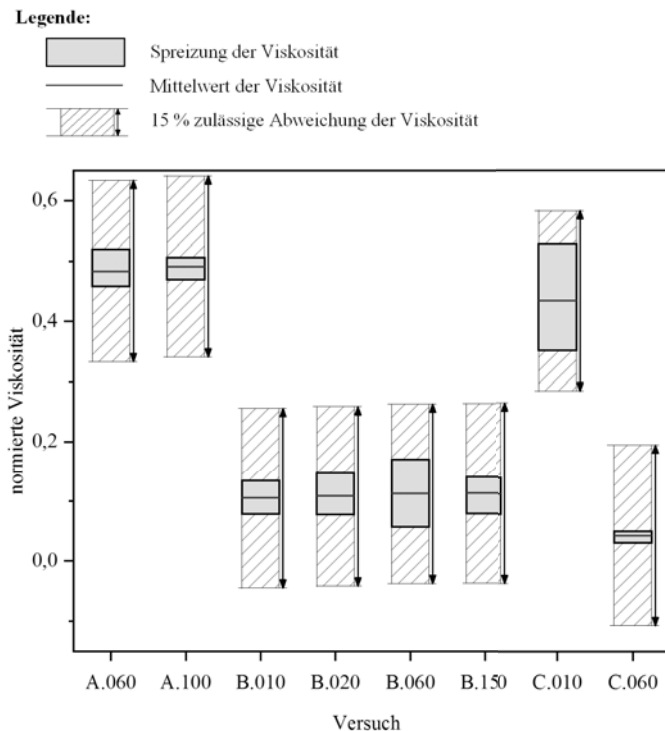


Bild 5.1: Gemessene Spreizung der Viskosität innerhalb eines Versuches; ausgewählte Versuche im Vergleich.

In den Bildern umfasst eine Box die Spreizung der Messergebnisse. Sie beginnt beim minimalen Messwert und endet beim maximalen Wert. Durch eine Linie innerhalb der Box wird der Mittelwert der Messwerte des jeweiligen Versuches dargestellt. Anhand der

Spreizung der Messwerte kann der Durchmischungszustand der Versuchsflüssigkeit abgeschätzt werden. Läuft die Spreizung über den straffierten Bereich, der die $\pm 15\%$ Grenze (siehe Kapitel 4.3) aufzeichnet, hinaus, ist dieser Versuch nach der konventionellen Probenuntersuchung nicht durchmischt. Eine maximale Spreizung von 30 % ist möglich, sodass ein Versuch bei schlechter Durchmischung als durchmischt gilt. Der Bereich durchmischter Flüssigkeiten spannt sich ausgehend vom Mittelwert der Probenergebnisse auf. Dieser ist als Erwartungswert für die Messungen eingesetzt, da die Entnahme von Nullproben bei den Versuchsdurchführungen zum Methodenvergleich nicht möglich ist. Zwischen den Versuchen der gleichen Reihen unterscheidet sich dieser Erwartungswert, da die Proben nicht die gesamte Versuchsflüssigkeit abdecken. Aufgrund der zufälligen Verteilung von Anhäufungen des PSM-Vergleichsproduktes kann es dazu kommen, dass die Mittelwerte der Probenmesswerte unterschiedlich sind und damit auf unterschiedlichen Höhen in Bild 5.1 und Bild 5.2 liegen.

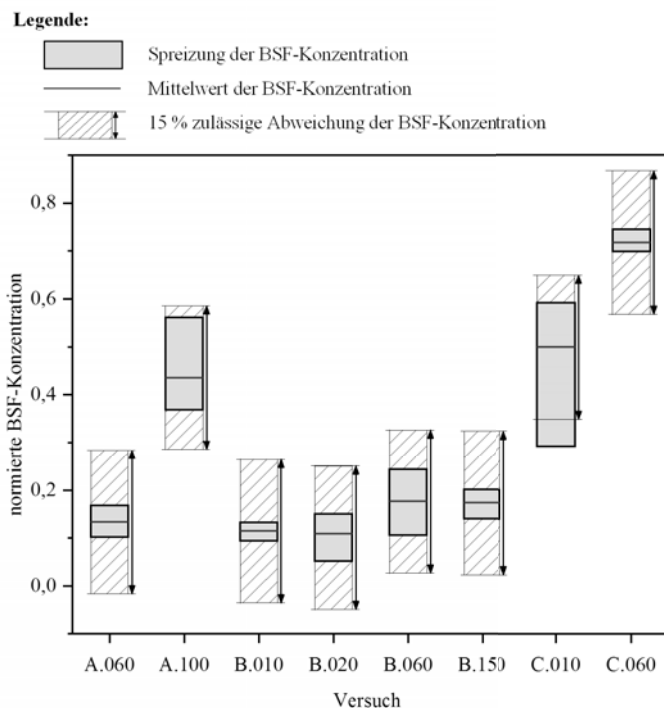


Bild 5.2: Gemessene Spreizung der BSF-Konzentration innerhalb eines Versuches; ausgewählte Versuche im Vergleich.

Ausgenommen Versuche A.100 und C.010, sind in beiden Verfahren die Tendenzen der Versuche in Bezug auf ihren Mischungszustand gleich. Der Versuch A.100 weist bei der rheologischen Untersuchung eine geringe Spreizung auf. Im Gegensatz dazu steht die große Spreizung der Fluoreszenzmessung. Versuche A.100 und C.010 zeigen außerdem, dass bei den beiden Messverfahren verschiedene Aussagen über den Mischungszustand entstehen können. Nach der Messung der Fluoreszenz ist der Versuch C.010 nicht durchmischt, während er nach der Messung der Viskosität als durchmischt gilt. Diese Differenzen treten trotz wiederholter Messungen auf. Im Vergleich zum subjektiv wahrgenommenen Mischungszustand von Versuch C.010 kann die gemessene schlechte Mischqualität der Fluoreszenz des Versuches nicht bestätigt werden (siehe Bild 5.3).

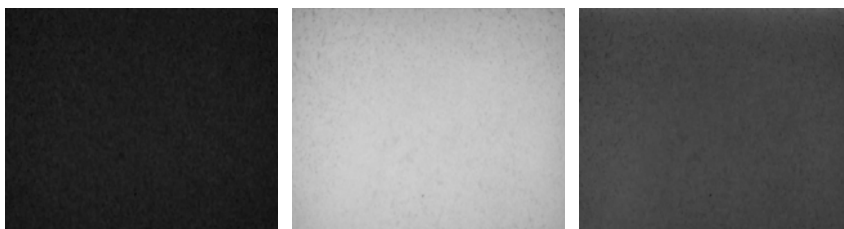


Bild 5.3: Versuchsaufnahme C.010 zerlegt in seine RGB-Anteile. Rotes Farbwertebild (li.); grünes Farbwertebild (mi.); blaues Farbwertebild (re.).

Die Abweichung in den Ergebnissen der beiden Messmethoden zeigen, dass das Misch- und Lösungsverhalten von BSF in Wasser anders ist, als das Verhalten des PSM-Vergleichsproduktes und damit des Verdickungsmittels Xanthan in Wasser. Eine Verbindung auf molekularer Ebene zwischen BSF und Xanthan entsteht demnach nicht. Anhand der Messergebnisse kann darauf zurückgeschlossen werden, dass der Tracer BSF sich bevorzugt mit Wasser verbindet. Im Untersuchungsfall der vorliegenden Arbeit werden Rückschlüsse auf die Mischqualität gezogen und damit wird die qualitative Vermengung zwischen dem PSM-Vergleichsprodukt und Wasser untersucht. Die dynamische Viskosität ist eine direkte Größe dieses Untersuchungszusammenhangs. Wie sich bei dem Vergleich der Messergebnisse der beiden Methoden gezeigt hat, liefert die Untersuchung der Fluoreszenz Aussagen über den Mischungszustand zwischen dem Tracer BSF und Wasser. Dieser Mischungszustand ist für die Untersuchung der Mischqualität allerdings nicht entscheidend. Daher ist die konventionelle Prüfung der Fluoreszenz aus der nachfolgenden Betrachtung der Versuchsergebnisse ausgeschlossen und die konventionelle Messmethode zur Untersuchung der Viskosität wird als Referenzmessverfahren für die Validierung der EPM gewählt.

Durch den Ausschluss der Messung der Fluoreszenz als konventionelles Prüfverfahren für den vorliegenden Untersuchungsfall ist die Notwendigkeit der Zugabe eines Tracers für die Versuche zu überprüfen. Hierzu wurden die Versuche B.270 und B.280 durchgeführt (siehe

Bild 5.4 und Anhang). Die Erkenntnis dieser Versuche liegt darin, dass der Mischungszustand auch ohne fluoreszierenden Tracer sichtbar ist. Allerdings nimmt unter den verwendeten Versuchsbedingungen und Ausleuchtungen das Farbwertespektrum der Bildaufnahme ab. Im RGB-Histogramm ist zu sehen, dass der Blauanteil der Farbwerte sich deutlich anders verhält als die Anteile Rot und Grün. Zurückgeführt werden kann das auf die UV-Ausleuchtung mit Hilfe der UV-Licht-LEDs. Ob die EPM auch ohne Tracer gleichwertig zum derzeitigen Verfahren funktioniert, ist in weiteren Arbeiten noch zu untersuchen, die beispielsweise das gesamte Lichtspektrum zur optimalen Ausleuchtung nutzen.

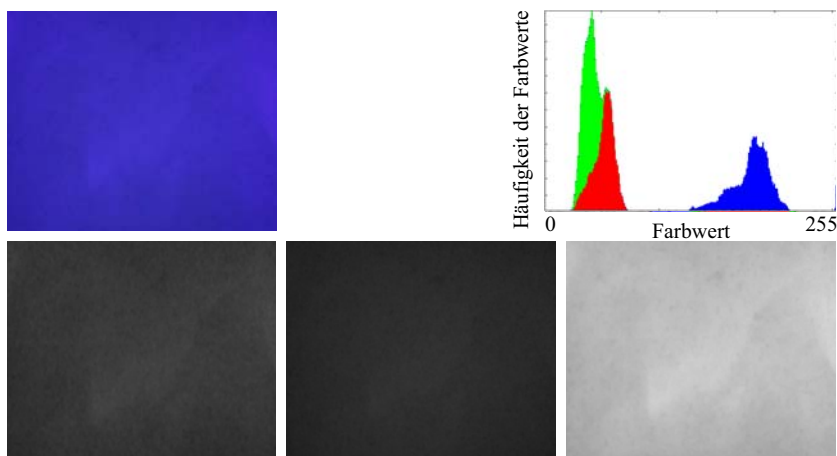


Bild 5.4: Versuchsaufnahme B.270 Versuchsflüssigkeit ohne BSF. Farbwertebild RGB (oben li.); RGB-Farbwertehistogramm (oben re.); Farbwertebild Rotanteil (unten li.); Farbwertebild Grünanteil (unten mi.); Farbwertebild Blauanteil (unten re.).

Tabelle 5.2: Messdaten der dynamischen Viskosität η drei ausgewählter Versuche untergliedert in die einzelnen Proben eines Versuches.

Probennr.	B.061	B.062	B.063	B.064	B.065	B.066
η [mPa·s]	59,36	70,67	84,17	28,84	29,87	63,75
Probennr.	B.151	B.152	B.153	B.154	B.155	
η [mPa·s]	69,5	68,8	63,0	41,9	39,5	
Probennr.	B.221	B.222	B.223	B.224	B.225	B.226
η [mPa·s]	80,17	154,9	55,82	29,27	28,52	31,39

Tabelle 5.2 zeigt die Messdaten der dynamischen Viskosität aus drei ausgewählten Versuchen der Reihe B. Diese Daten werden im Auswertungsverfahren mit Hilfe der empirischen Varianz der Viskosität normiert. Anschließend erfolgt die Berechnung der Spreizung und der Abweichung der Messdaten von ihrem Mittelwert (siehe Tabelle 5.3). Entgegen der Rührwerksprüfung wird der Mittelwert der Proben als Erwartungswert eingesetzt, da aufgrund der Versuchsdurchführung keine Nullproben entnommen werden konnten. Auch im Nachgang der Bildaufnahme und der Probenentnahme ist eine Homogenisierung der Versuchsflüssigkeit zur Entnahme einer Nullprobe wenig sinnvoll, da Versuchsflüssigkeit mit unterschiedlichen Mengenanteilen an PSM-Vergleichsprodukt und Wasser mit den 20 ml Proben entnommen worden sind.

Tabelle 5.3: Messergebnis ausgewählter Versuche aus der Messung der dynamischen Viskosität.

Versuch	Spreizung der normierten η	Positive Abweichung der normierten η	Negative Abweichung der normierten η
B.150	6,1 %	2,6 %	3,5 %
B.060	11,3 %	5,7 %	5,6 %
B.220	21,5 %	15,6 %	5,9 %

Wird die Spreizung der Messwerte betrachtet, ist erkennbar, dass je größer die Spreizung der gemessenen dynamischen Viskosität aus einem Versuch ist, desto schlechter ist die Versuchsflüssigkeit durchmischt. Liegt eine der errechneten Abweichungen vom

Erwartungswert der Viskosität höher als 15 %, wird der festgelegte Grenzwert überschritten und der Versuch gilt nach konventionellen Prüfverfahren als nicht durchmischt. Nach Tabelle 5.3 sind die Versuche B.060 und B.150 durchmischt, während der Versuch B.220 durch seine positive Abweichung der Messwerte vom Erwartungswert von + 15,6 % als nicht durchmischt gilt (siehe auch Bild 5.5).

Legende:

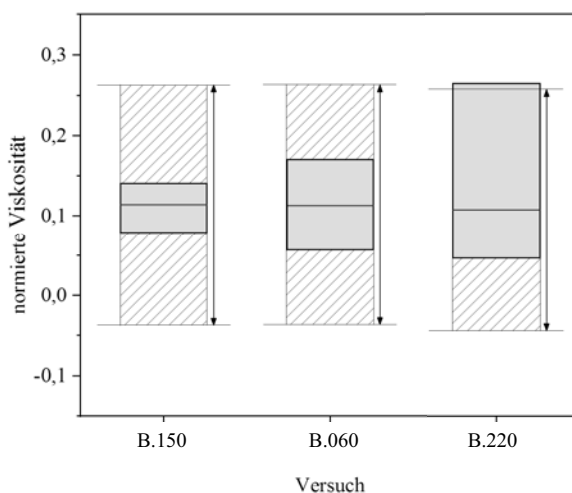
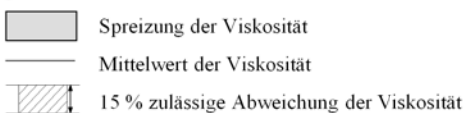


Bild 5.5: Gemessene Spreizung der Viskosität innerhalb eines Versuches; drei Versuche der Reihe B im Vergleich.

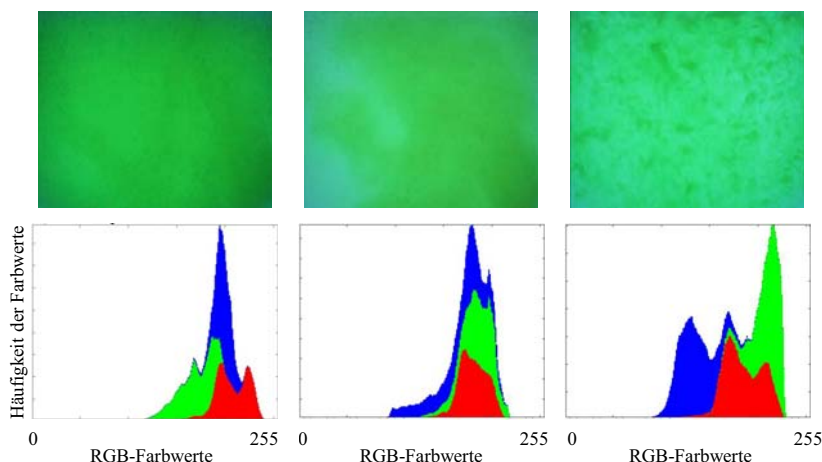


Bild 5.6: Bildaufnahmen mit den dazugehörigen RGB-Histogrammen von Versuchen der Reihe B; B.150 (li.); B.060 (mi.); B.220 (re.).

Erfolgt die Versuchsauswertung durch die EPM, werden die in MATLAB eingelesenen Bildaufnahmen zunächst durch die Erzeugung eines Differenzbildes bearbeitet (siehe Kapitel 4.3). Anschließend findet die Berechnung der jeweiligen RGB-Histogramme statt (siehe Bild 5.6).

Die Breiten der einzelnen Farbwerteanteile R, G und B werden als erstes Zwischenergebnis der Analyse ausgegeben. Mit Hilfe der Gleichung (4.2) kann das Qualitätskriterium der Bildaufnahme aus den Breiten der Farbwerteanteile berechnet werden. Aus dem Qualitätskriterium allein können keine Rückschlüsse auf den Mischungszustand des Versuches gezogen werden. Benötigt wird ein Qualitätskriterium als Referenz für einen optimal durchmischten Versuch. Zur Ermittlung dieser Größe sind Versuche durchgeführt worden, die bestmöglich durchmischt sind. Das mittlere Qualitätskriterium dieser Versuche wird als optimales Qualitätskriterium gewählt. Bedingt durch den Herstellungsprozess der Versuchsflüssigkeiten treten Luftpneinschlüsse in dieser auf, die in den Bildaufnahmen durch kleine Blasen sichtbar sind. Durch ihre Eigenschaft erzeugen diese Blasen ein breiteres Spektrum des aufgenommenen Lichtes als es ohne Blasen vorliegen würde. Das bedeutet für Versuche, dass Versuchsflüssigkeiten mit weniger Luftpneinschlüssen ein geringeres Qualitätskriterium aufweisen können als das gewählte, optimale Qualitätskriterium. Bei solchen Versuchen ist das Qualitätskriterium in der weiteren Berechnung gleich dem optimalen Qualitätskriterium zu setzen.

Der Vergleich der Ergebnisse der konventionellen Methode und der EPM hat ergeben, dass die Berücksichtigung eines Faktors k in der Berechnung der prozentualen Abweichung der

Mischqualität notwendig ist. Dieser Faktor ist empirisch ermittelt und ist das Äquivalent zur $\pm 15 \%$ Grenze bei der konventionellen Ergebnisauswertung. Um nun auf den Mischungszustand der Versuchsflüssigkeiten zu schließen, ist die Verbindung der Qualitätskriterien mit dem Faktor k notwendig. Die Abweichung der Mischqualität berechnet sich durch folgende Gleichung:

$$p = k \cdot \frac{(\Pi - \Pi_{opt})}{2} * 100, \quad \Pi_{opt} = 0,18, \quad k = 2,8 \quad (5.1)$$

mit

p	Prozentsatz der Abweichung der Mischqualität im positiven wie negativen Bereich
k	empirisch ermittelter Faktor
Π	Qualitätskriterium
Π_{opt}	durchschnittliches Qualitätskriterium der durchmischten Versuche bei den gegebenen Umgebungsbedingungen

Die Abweichung der Mischqualität ist für die drei beispielhaft dargestellten Versuche der Reihe B aus Bild 5.6 in Tabelle 5.4 aufgeführt. Das Prüfungsergebnis aus dem Bildauswertungsverfahren und damit der EPM zeigt, dass der Versuch B.150 durchmischt ist. Die beiden Versuche B.060 und B.220 hingegen werden durch die EPM als nicht durchmischt eingestuft. Bei einer subjektiven Einschätzung des Durchmischungszustandes anhand der Bildaufnahmen, wird Versuch B.150 als durchmischt und Versuch B.220 als nicht durchmischt eingeschätzt. Der Versuch B.060 stellt einen Versuch im Grenzbereich der Durchmischung dar. Dieser kann subjektiv nicht mit einer klaren Aussage über dessen Mischungszustand belegt werden. Aus dem konventionellen Prüfverfahren und der EPM liegen unterschiedliche Ergebnisse zu diesem Versuch vor. Konventionell wird der Versuch als durchmischt eingeschätzt und durch die EPM als nicht durchmischt. Aufgrund welcher Zusammenhänge diese Unterschiede im Prüfergebnis von Grenzversuchen auftreten, wird im nachfolgenden Kapitel diskutiert.

Tabelle 5.4: Auswertungsergebnis der ausgewählten Versuche aus der EPM.

Versuch	R	G	B	Qualitätskriterium Π	Abweichung der Mischqualität p
B.150	74	71	40	0,238	$\pm 8,1 \%$
B.060	71	78	118	0,345	$\pm 23,1 \%$
B.220	84	63	80	0,293	$\pm 15,8 \%$

6 Plausibilität der echtzeitfähigen Prüfmethode

Die EPM und die rheologische Prüfmethode stimmen in ihrem Ergebnis für gut durchmischte und nicht durchmischte Versuche überein. Auch in der subjektiven Wahrnehmung lassen sich diese Versuche eindeutig identifizieren. Eine Differenz im Ergebnis tritt bei den beiden Methoden für sogenannte Grenzversuche auf. Grenzversuche sind solche, die subjektiv nicht eingeschätzt werden können und meist nah an der festgelegten Durchmischungsgrenze von $\pm 15\%$ liegen. Hier wird die Frage aufgeworfen, welche Methode einen Versuch besser bewerten kann und damit die entscheidende Kategorisierung der Versuche gibt.

Um dies abschätzen zu können, wird nachfolgend eine Fehlerbetrachtung zu der Versuchs- und Auswertungsdurchführung angestellt und eine Genauigkeitsabschätzung auf die Methoden angewendet. Anschließend erfolgt die Vorstellung einer möglichen Prüfeinrichtung der EPM mit ihren Eigenschaften und eine Aufführung der notwendigen Untersuchungen, um diese zu einer vollwertigen Prüfmethode weiterentwickeln zu können.

6.1 Fehlerbetrachtung der Versuchs- und Auswertungsdurchführung

Daten aus einer Messung besitzen Messabweichungen zu ihrem ausgegebenen Wert. Diese Messabweichungen setzen sich aus der zufälligen Abweichung und der systematischen Abweichung zusammen. Die zufälligen Abweichungen beschreiben solche, die aus nicht beherrschbaren Einflüssen oder Änderungen den Wert des Messergebnisses verändern. Bei Wiederholungsmessungen tritt die zufällige Abweichung variabel in ihrem Wert auf. Die systematische Abweichung hingegen beschreibt die Abweichung, die unter Wiederholungsbedingungen einer Messung in der gleichen, gerichteten Größe auftritt. Der Wert der systematischen Abweichung bleibt demnach bei demselben Messverfahren unter gleichen Bedingungen identisch. [DIN95]

In Bezug auf die durchgeführten Versuche und Prüfmethoden ist zu entscheiden, welche Abweichungen aus den verschiedenen Ursachen resultieren. Für einen direkten Methodenvergleich zwischen der konventionellen Prüfmethode und der EPM sind die systematischen Abweichungen bei vernachlässigbaren zufälligen Abweichungen relevant. Sie geben die Möglichkeit der Einschätzung der Genauigkeit der jeweiligen Methode in greifbaren Daten. Zu beachten ist, dass diese Daten nur im Vergleich der Methoden untereinander betrachtet werden und damit die Genauigkeit keine Kenngröße der Methode darstellt.

Um die Genauigkeit der Methoden zu ermitteln, werden zunächst die Ursachen für Abweichungen identifiziert und als zufällige oder systematische Abweichungen beschrieben. Anschließend wird im nächsten Unterkapitel die zufällige sowie die systematische

Abweichung an einem Beispiel berechnet. Aus dieser Berechnung wird die Genauigkeitsabschätzung der Methoden hergeleitet.

Wird der gesamte Prozess zur Prüfung der Mischqualität in Teilprozesse untergliedert, sind die Versuchsvorbereitung und die Versuchsdurchführung die ersten Teilprozesse, die beide Prüfmethoden nutzen. Im dritten Teil untergliedert sich die Prüfung in die beiden genutzten Methoden. Dieser Teil beginnt mit der Erstellung der Bildaufnahmen sowie der Probenentnahme (siehe Bild 6.1).

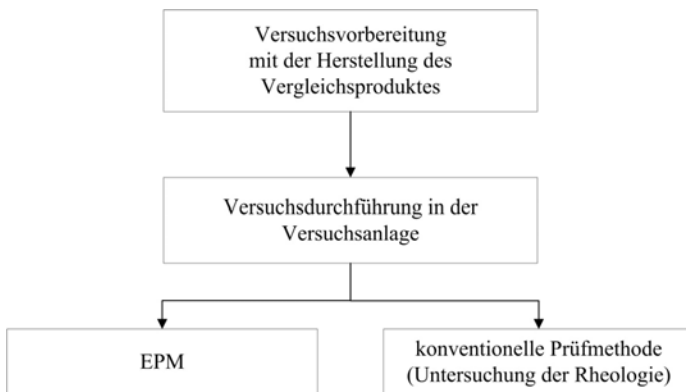




Bild 6.1: Teilprozesse der Prüfung der Mischqualität.

Der Teilprozess der Versuchsvorbereitung ruft die wesentlichen Abweichungen durch die Herstellung des PSM-Vergleichsproduktes hervor. Diese Herstellung teilt sich in Prozessschritte zur Bereitstellung der Komponenten, Mischen bzw. Rühren dieser Komponenten mit einer anschließenden Ruhephase und der Eingabe in den Vorratsbehälter im Versuchsstand auf. Messabweichungen treten durch die Benutzung von Waagen als Messeinrichtungen auf. Für die größeren Mengen wurde eine digitale Waage VIC-5101 von ACCULAB mit einer Genauigkeit von 0,1 g und für kleine Mengen eine manuelle Waage von METTLER mit einer Genauigkeit von 0,0001 g verwendet. Die Messabweichungen von Waagen unterteilen sich in zufällige wie auch systematische Abweichungen. Die systematischen Abweichungen werden durch die Kalibrierung des Herstellers so klein gehalten, dass die zufälligen Abweichungen beispielsweise aufgrund von Temperatur- oder Luftfeuchteveränderungen den wesentlichen Anteil der Abweichung ausmachen. Daher ist die systematische Abweichung bei Waagen vernachlässigbar. Die zufällige Abweichung beschreibt die Abweichung der Gewichtsmessungen und damit der Komponenten des PSM-Vergleichsproduktes (siehe Bild 6.2).

Des Weiteren tritt beim Mischen von Wasser mit dem pulverförmigen Xanthan eine zufällige Abweichung durch eine ungleichmäßige Verteilung des Pulvers im Wasser auf. Es kann zu

lokalen Anhäufungen des Xanthans kommen, die sich durch Klumpenbildung beobachten lassen. Sie lösen sich nach subjektiver Einschätzung durch längere Rühr- und Ruhephasen auf. Während der Ruhephase des PSM-Vergleichsproduktes kann es aufgrund der Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Luftströmungen zur Verdampfung von Flüssigkeit kommen. Durch die Abdeckung des PSM-Vergleichsproduktes ist diese zufällige Abweichung gering gehalten. Ist das PSM-Vergleichsprodukt fertiggestellt, wird der Tracer BSF in dieses eingerührt. Die geringen Mengen des BSF sind wiederum mit der zufälligen Abweichung der Gewichtsmessung beaufschlagt. Wird das PSM-Vergleichsprodukt in den Vorratsbehälter der Versuchsanlage gegeben, bleiben Rückstände im Rührbehälter. Durch die Unsicherheit der gleichmäßigen Verteilung der Komponenten können diese Rückstände ebenfalls zu einer zufälligen Abweichung des PSM-Vergleichsproduktes führen.

Legende:

VP	Vergleichsprodukt
	systematische Abweichung
	zufällige Abweichung

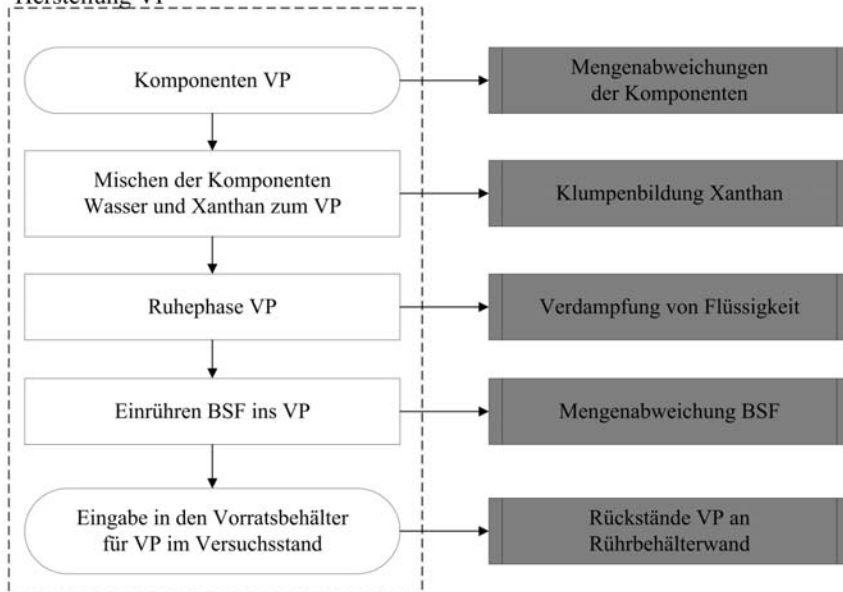


Herstellung VP


Bild 6.2: Fehlerabschätzung im Prozess der Versuchsvorbereitung.

Im nächsten Teilprozess der Versuchsdurchführung werden Ursachen für Abweichungen in der Pumpenförderung sowie in der Zusammenführung der Versuchsstoffe zur

Versuchsflüssigkeit im Injektor gesehen (siehe Bild 6.3). Die verwendeten Pumpen sind in ihrem Volumenstrom regelbar und werden für das benötigte Volumen der Versuchsstoffe in einem entsprechenden Zeitintervall betrieben. Durch Verzögerungszeiten bei der An- und Abschaltung der Pumpen kommt es zu einer fehlerhaften Dosierung der Versuchsstoffe. Diese Abweichung in der Dosierung ist ebenfalls zufälliger Natur. Bei der Zusammenführung im Injektor werden die Versuchsstoffe in unterschiedlich langen Zeitintervallen zugeführt. bei der Konstellation von 8,5 l Wasser mit 1,5 l PSM-Vergleichsprodukt bedeutet es, dass über den gesamten Förderzeitraum Wasser durch den Injektor in den Auffangtank fließt, während das PSM-Vergleichsprodukt in einer wesentlich kürzeren Sequenz parallel zum Wasser gefördert wird. Das PSM-Vergleichsprodukt wird möglichst zu Anfang der Einspeisung in den Wasservolumenstrom eingegeben. Dadurch entsteht ein Förderungsstillstand des PSM-Vergleichsproduktes am Ende der Einspeisung. Durch die Versuchsanlagenanordnung tritt im Injektor ein Venturi-Effekt auf, der bei Stillstand der Förderung des PSM-Vergleichsproduktes weiteres PSM-Vergleichsprodukt mit dem Wasserstrom mitreißt. Die zusätzliche Menge des PSM-Vergleichsproduktes wird durch eine zufällige Abweichung in die Fehlerbetrachtung miteinbezogen.

Legende:

VP	Vergleichsprodukt
	systematische Abweichung
	zufällige Abweichung

Versuchsdurchführung

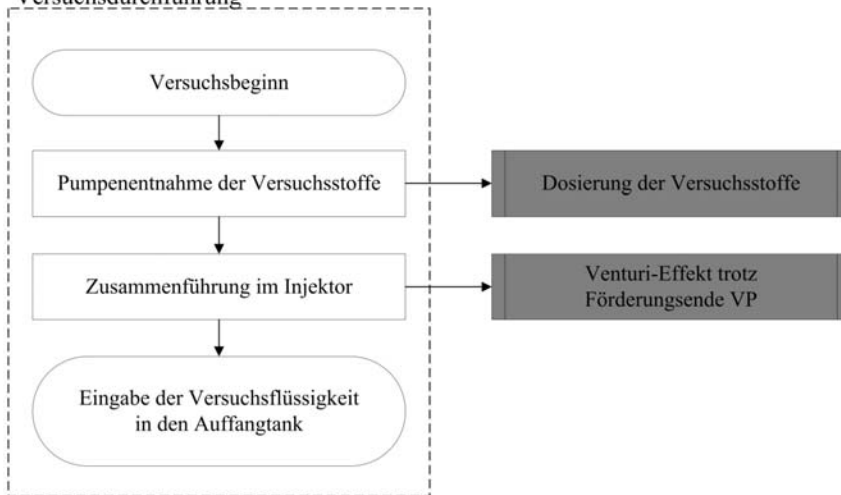


Bild 6.3: Fehlerabschätzung im Prozess der Versuchsdurchführung.

Liegt die Versuchsflüssigkeit im Auffangtank der Versuchsanlage vor, beginnen die beiden Teilprozesse der Prüfmethoden. Zunächst wird die EPM der Fehlerbetrachtung unterzogen (siehe Bild 6.4). Um die Bildaufnahme zur Versuchsauswertung durch die EPM erstellen zu können, wird die UV-Beleuchtung eingeschaltet. Die kleine Abweichung, die hier durch eine zufällige Intensitätsveränderung der Lichtquelle auftreten kann, wird vernachlässigt. Bei der Versuchsauswertung der Bildaufnahme sind die Lichteinflüsse auf die Aufnahme in ihrer Beeinflussung auf das Messergebnis größer als die Intensitätsveränderungen der Lichtquelle. D. h. die Lichtreflexionen an Komponenten der Versuchsanlage beschreiben den wesentlichen Teil der hervorgerufenen, zufälligen Abweichung. Die Reflexionen beeinflussen gerade die Randbereiche der Versuchsflüssigkeit im Auffangtank. Weitestgehend wurden diese Einflüsse durch den ausgewählten Bildbereich der Aufnahmen im Auswertungsverfahren gefiltert. Da jedoch keine konkrete Grenze für den Einflussbereich der Lichtreflexionen erkennbar ist, ist diese zufällige Abweichung dennoch zu berücksichtigen.

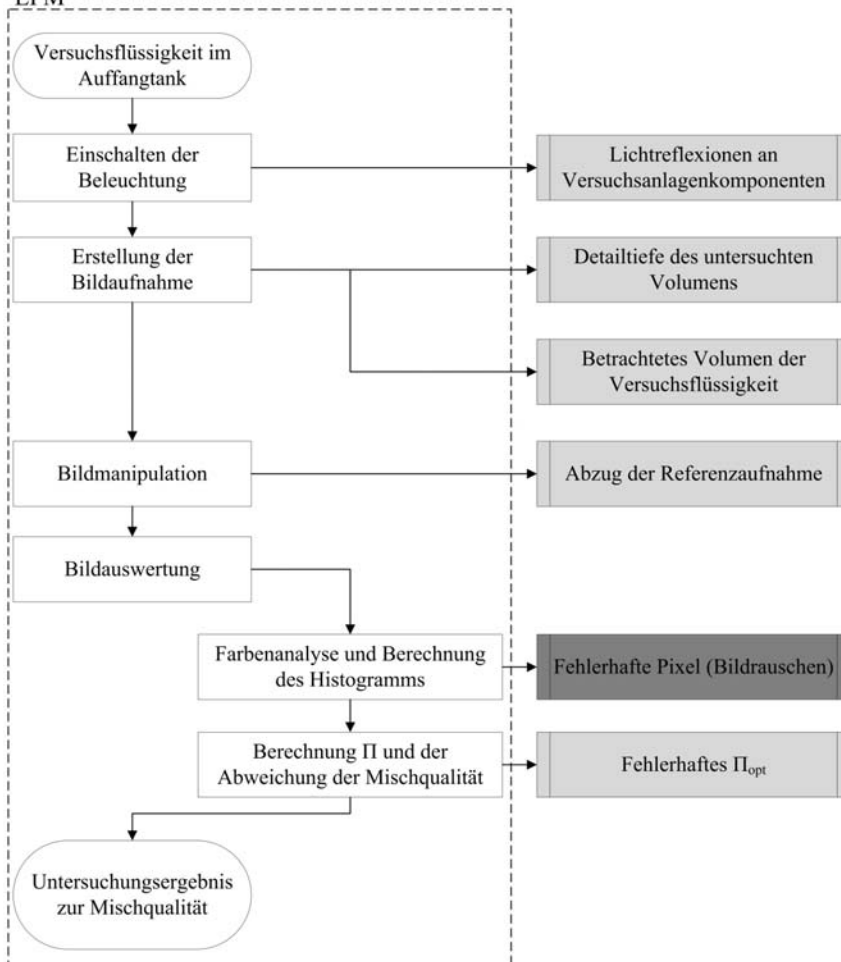
Bei der Erstellung der Bildaufnahmen wird die Versuchsflüssigkeit an der vorderen Wand im Auffangtank abgebildet. Die hinteren Schichten der Versuchsflüssigkeit beeinflussen die Aufnahme, stehen aber nicht im Vordergrund der Betrachtung bei der Bildauswertung. Jedes Pixel einer Aufnahme enthält eine Summe der Versuchsflüssigkeit, die hinter diesem liegt. Die Detailtiefe des untersuchten Volumens beschreibt daher die Homogenisierung der Versuchsflüssigkeit in den Pixeln einer Bildaufnahme. Da diese Detailtiefe bei jeder Untersuchung der EPM dieselbe Einschränkung hervorruft, resultiert aus ihr eine systematische Abweichung.

Bei der Einschränkung des Untersuchungsraumes durch den beschnittenen Bildausschnitt fällt Volumen der Versuchsflüssigkeit aus der Betrachtung durch die EPM heraus. Das betrachtete Gesamtvolumen der Versuche ist gegenüber dem Volumen der Versuchsflüssigkeit im Auffangtank reduziert. Wie bei der Detailtiefe resultiert aus der Eingrenzung des betrachteten Volumens eine systematische Abweichung.

Als Fehlerquelle beim Prozessschritt der Bildmanipulation lässt sich der Abzug der Referenzaufnahme des jeweiligen Versuches identifizieren. Hier werden Umgebungseinflüsse, wie die Lichtreflexionen der Versuchsanlagenkomponenten, im gesamten Arrangement der Versuchsanlage aufgenommen und von der Bildaufnahme des Versuches abgezogen (siehe Kapitel 4.3). Die Einflüsse der Versuchsflüssigkeit und damit die Lichtdurchdringung dieser sind bei der Referenzaufnahme nicht berücksichtigt. Dadurch entsteht hier ein systematischer Fehler, der die Farbwiedergabe der Bildaufnahme für die Bildauswertung verändert.

Legende:

- Π Qualitätskriterium
 — systematische Abweichung
 — zufällige Abweichung

EPM**Bild 6.4:** Fehlerabschätzung der EPM.

Als letzter Prozessschritt in Bild 6.4 ist die Bilddauswertung aufgeführt. Sie lässt sich in die Farbanalyse und Berechnung des Histogramms sowie in die Berechnung des Qualitätskriteriums und der Abweichung der Mischqualität unterteilen. In der Bildaufnahme

können fehlerhafte Pixel auftreten. Dies sorgt z. B. für ein Bildrauschen und eine fehlerhafte Breite des Histogramms. In der Analyse ist daher eine Pixelgrenze eingearbeitet, die diese fehlerhaften Pixel herauskürzt und sich auf die wesentlichen Bildinformationen beschränkt. Die Pixelgrenze kann jedoch auch zu Kürzungen von sinnvollen Pixeln führen. Daher weicht die berechnete Histogrammbreite von der realen Breite ab und es kommt in diesem Prozessschritt zu einer zufälligen Abweichung.

Die Berechnung des Qualitätskriteriums nutzt das durchschnittliche Qualitätskriterium der optimal durchmischten Versuche. Die Herstellung der Versuchsflüssigkeiten zur Bestimmung des optimalen Qualitätskriteriums ist manuell erfolgt. Da im maschinellen Verfahren zur Erzeugung der Versuchsflüssigkeit die Flüssigkeiten jedoch auch besser und evtl. mit weniger Lufteinschlüssen hergestellt werden, treten Versuche auf, die besser durchmischt sind als die Versuche zur Identifizierung des optimalen Qualitätskriteriums. Die Bildauswertung wird hier durch die systematische Abweichung des optimalen Qualitätskriteriums beeinflusst.



Gegenüber den Abweichungen bei der Durchführung der EPM steht die Fehlerbetrachtung der rheologischen Prüfmethode. In Bild 6.5 ist diese Methode in ihre Prozessschritte zerlegt und die Ursachen für die Abweichungen beschrieben. Durch die Probenentnahme der Versuchsflüssigkeit werden die ersten Abweichungen der Methode hervorgerufen. Wie bei der EPM beeinflusst die Homogenisierung des Entnahmevolumens einer Probe die Detailtiefe der Methodenauswertung. Unabhängig von der im Auffangtank vorliegenden Mischqualität wird das entnommene Volumen von 20 ml innerhalb der Probe in eine gut durchmischte Flüssigkeit umgewandelt. Durch die gleiche Vorgehensweise bei den Versuchen liegt hier wieder eine systematische Abweichung vor.

Ebenfalls mit der Detailtiefe lässt sich auch das betrachtete Volumen der Versuchsflüssigkeit durch die Proben als Abweichung identifizieren. Bei der Untersuchung der Proben wird nur ein Teil der im Auffangtank vorliegenden Versuchsflüssigkeit berücksichtigt. Welche Konzentration bzw. Viskosität der Rest der Versuchsflüssigkeit besitzt, wird nicht untersucht. D. h. aus dem eingeschränkten untersuchten Volumen resultiert ebenfalls eine systematische Abweichung.

Nach der Entnahme erfolgt die Lagerung der Proben bis sie im Rheometer untersucht werden. Dazu sind die Proben in einem gebräuchlichen Gefriergerät eingefroren. Durch unterschiedliche Kältezonen in einem solchen Gerät, treten an den Proben unterschiedliche Temperatureinflüsse auf. Es kann bei Gefriergut über einen langen Zeitraum zu Gefrierbrand kommen. Die Temperatureinflüsse können dann zu einer Strukturveränderung der Probe führen und damit eine andere gemessene Viskosität ausgeben als direkt nach der Versuchsdurchführung. Durch plausible Messergebnisse der Proben eines Versuches wird davon ausgegangen, dass kein Gefrierbrand aufgetreten ist. Die Abweichungen von

Temperatureinflüssen die verschieden auf die Proben wirken werden durch eine zufällige Abweichung beschrieben.

Legende:

-  systematische Abweichung
 zufällige Abweichung

Rheologische Untersuchung

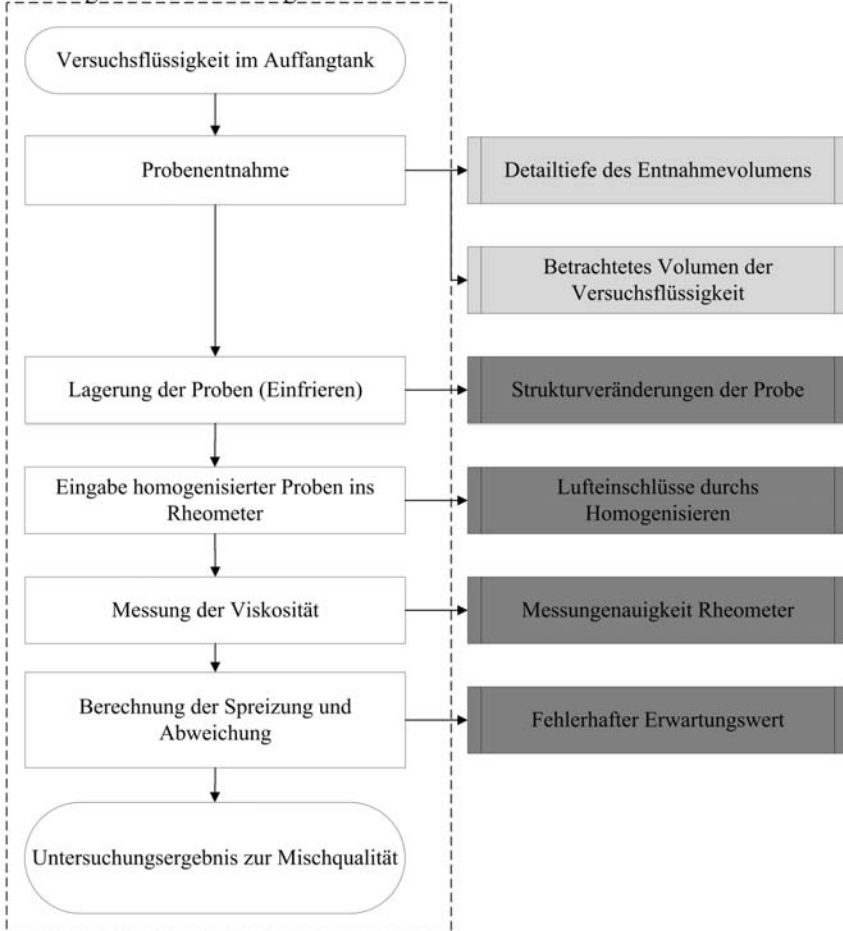


Bild 6.5: Fehlerabschätzung der durchgeführten, rheologischen Prüfmethode.

Zur Eingabe der Proben ins Rheometer nach dem Auftauen, wird jede Probe nochmals homogenisiert (Bild 6.5). Hier entstehen bei jeder Probe individuell Luftpinschlüsse, die das

Messergebnis der Viskosität beeinflussen. Diese Abweichung ist wieder zufälliger Natur. An die Homogenisierung schließt sich die Messung der Viskosität an. Die Messungenauigkeit des Rheometers beeinflusst das Ergebnis als zufällige Abweichung. Als abschließender Schritt zum Untersuchungsergebnis wird die Auswertung der konventionellen Probenuntersuchung durchgeführt. Die Berechnung der Spreizung und die Abweichung der Viskosität vom Erwartungswert führen zu dem Ergebnis der Messung der Methode. Durch den Untersuchungsfall muss der Erwartungswert aus dem arithmetischen Mittelwert der Viskosität der sechs Proben eines Versuches gebildet werden. Dieser Erwartungswert kann jedoch von dem wirklichen Erwartungswert der Versuchsflüssigkeit abweichen, da durch die Proben nicht die gesamte Flüssigkeit untersucht ist. Durch die individuelle Abweichung innerhalb eines Versuches, lässt sich die Abweichung des Erwartungswertes als zufällig beschreiben.

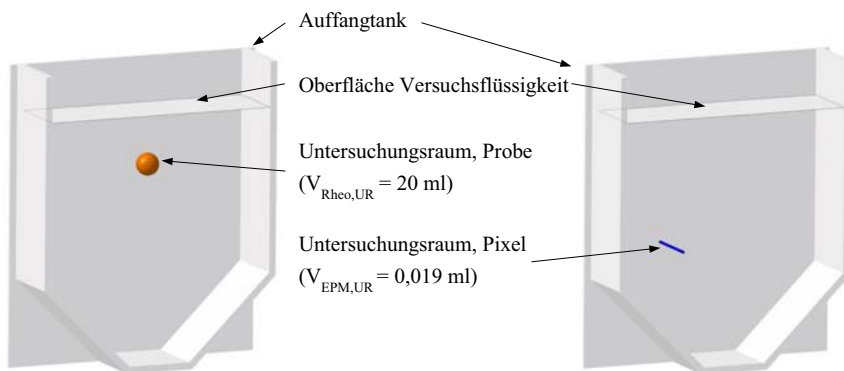


Bild 6.6: Vergleich des Untersuchungsraumes der konventionellen Methode (li.) und der EPM (re.)

Zur Verdeutlichung der systematischen Abweichungen in der Detailtiefe und dem betrachteten Volumen der beiden Prüfmethoden, sind in Bild 6.6 die zwei unterschiedlichen Methodenvolumen dargestellt. Durch die EPM wird bei der Detailtiefe der Methode das Volumen der Versuchsflüssigkeit hinter einem Bildpixel, das die Fläche von $190 \mu\text{m}$ erfasst, homogenisierend betrachtet. Das bedeutet, dass das Volumen von $0,019 \text{ ml}$ den Untersuchungsraum hinter einem Bildpixel bei der EPM bildet (siehe Tabelle 6.1). Dieser ist aufgrund geometrischer Beziehungen annähernd zylinderförmig. Bezogen auf das Gesamtvolumen der Versuchsflüssigkeit betrachtet ein einzelner Untersuchungsraum $0,00019 \%$ der Versuchsflüssigkeit. Bei den Methoden wird außerdem das betrachtete Volumen durch die Reduzierung des Bildes um die Randbereiche der Versuchsflüssigkeit eingeschränkt. Diese Einschränkung der Versuchsflüssigkeit wird mit den ausgewerteten

Bildpixeln beschrieben. Für die EPM bedeutet es, dass durch die betrachteten Bildpixel 87 % der Versuchsflüssigkeit berücksichtigt werden.

Im Vergleich zur EPM steht die konventionelle (rheologische) Prüfmethode. Sie nutzt die Untersuchung der entnommenen Proben hinsichtlich ihrer Viskosität. Die 20 ml-Proben sind definiert an sechs Stellen im Tank mit Hilfe einer Spritze mit Schlauchverlängerung entnommen. Die entstehende zufällige Abweichung des Probenvolumens durch die Spritzenentnahme wird mit nahezu Null angenommen, da sie im Verhältnis zur systematischen Abweichung dieses Prozessschrittes gering ist. Bei der Probenentnahme wird die Umgebungsflüssigkeit um das Schlauchende entnommen. Der homogenisierte Untersuchungsraum kann annähernd durch ein Kugelvolumen in Bild 6.6 dargestellt werden. Die sechs Untersuchungsräume zusammen prüfen 1,2 % der Versuchsflüssigkeit im Auffangtank. Auf das Gesamtvolumen bezogen werden mit jedem Untersuchungsraum 0,2 % der Versuchsflüssigkeit untersucht. Der Untersuchungsraum der rheologischen Prüfung ist identisch für die Untersuchung der Fluoreszenz, da die beiden Prüfungen dieselben Proben untersuchen.

Tabelle 6.1: Methodenvergleich in den systematischen Abweichungen resultierend aus dem betrachteten Untersuchungsraum.

Methode	EPM	rheologische Prüfung
Homogenisierter Untersuchungsraum	$V_{\text{EPM,UR}} = 0,019 \text{ ml}$	$V_{\text{Rheo,UR}} = 20 \text{ ml}$
Betrachtetes Volumen der Versuchsflüssigkeit	$87\% V_{\text{ges}}$ (VEPM = 8,7 l)	$1,2\% V_{\text{ges}}$ (VRheo = 0,12 l)
Volumenanteil eines Untersuchungsraumes bezogen auf das Gesamtvolumen der Versuchsflüssigkeit	1,9 ppm (0,00019%)	2.000 ppm (0,2 %)
Legende: $V_{\text{EPM,UR}}$ - Volumen des Untersuchungsraumes der EPM		
$V_{\text{Rheo,UR}}$ - Volumen des Untersuchungsraumes des rheologischen Methode		
V_{ges} - Gesamtvolumen der Versuchsflüssigkeit		

6.2 Genauigkeitsabschätzung der Prüfmethoden

Für die Bewertung der Methoden zueinander dienen die Berechnungen der Abweichungen, die sich aus der Fehlerbetrachtung ergeben. Die systematischen Abweichungen beschreiben die Genauigkeit der jeweiligen Methode. Diese darf bei einer kleinen zufälligen Abweichung, die vernachlässigbar ist, als Bewertungsgrundlage verwendet werden. Um Werte für die Abweichungen zu erhalten, werden die Berechnungsvorschriften aus DIN 1319-3 bezogen auf

die Messunsicherheit herangezogen. Eine Differenzierung der Vorschriften für zufällige und systematische Abweichungen ist in der Norm aufgezeigt, sie wird nachfolgend beschrieben und ist für die Berechnung der jeweiligen Abweichung eingesetzt. [DIN96]

Bei der Berechnung der zufälligen Abweichungen für die einzelnen Ursachen der Versuchsdurchführung und Auswertung ist nach [DIN96] zunächst der arithmetische Mittelwert der Messwerte zu berechnen. Dieser wird für den Erwartungswert μ einer Messung eingesetzt, wenn der Erwartungswert nicht bekannt ist. Der arithmetische Mittelwert ergibt sich aus den Messwerten und der Anzahl der Messungen:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j \quad (6.1)$$

mit

\bar{v} arithmetischer Mittelwert

n Anzahl der Messungen

v_j Messwert einer Messung ($j = 1, \dots, n$)

Ist die Standardabweichung σ nicht bekannt, berechnet sich mit Hilfe des Erwartungswertes μ oder des arithmetischen Mittelwertes und der Anzahl der Messungen die empirische Standardabweichung wie folgt:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (v_j - \bar{v})^2} \quad (6.2)$$

mit

s empirische Standardabweichung

\bar{v} arithmetischer Mittelwert

n Anzahl der Messungen

v_j Messwert einer Messung ($j = 1, \dots, n$)

Die empirische Standardabweichung liefert geteilt durch die Wurzel der Anzahl der Messungen die Unsicherheit, die als Ausdruck für die zufällige Abweichung verwendet wird:

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6.3)$$

mit

u	Unsicherheit der Messwerte
s	empirische Standardabweichung
n	Anzahl der Messungen

Liegen keine konkreten Messwerte für die Ursache einer zufälligen Abweichung vor, ist es zulässig den Erwartungswert μ und die Standardabweichung σ für eine Einschätzung der Abweichung sinnvoll zu wählen. Für den Erwartungswert μ liegen in vielen Zusammenhängen berechenbare oder herstellerseitig angegebene Werte vor. Diese werden für die Einschätzung zur Methodengenauigkeit herangezogen. Den Beobachtungen der möglichen Abweichungen folgend, sind die zugehörigen Standardabweichungen σ dieser Ursachen fundiert gewählt. Da bei solchen Abschätzungen ebenfalls keine konkreten Werte für die Anzahl der Messungen vorliegen, orientiert sich die Berechnung der Unsicherheit nach der Annahme der gleichmäßigen Rechteckverteilung der Messwerte, vergleichbar mit der Berechnung der systematischen Abweichungen (siehe Gleichung (6.5)). Obwohl diese Annahmen mit Unsicherheiten behaftet sind, sind sie ausreichend, um die zufälligen Abweichungen abschätzen zu können.

Tabelle 6.2: Werte der betrachteten, zufälligen Abweichungen am Beispiel von B.170.

Ursache	μ	σ	u_{rel}
Mengenabweichung der Komponente Wasser	998,2 g	-	$\pm 0,02 \%$
Mengenabweichung der Komponente Xanthan	33 g	-	$\pm 0,61 \%$
Klumpenbildung Xanthan	5,5 g	0,05 g	$\pm 0,06 \%$
Verdampfung von Flüssigkeit	10 l	5 ml	$\pm 0,14 \text{ ppm}$
Mengenabweichung BSF	0,1 g	-	$\pm 0,2 \%$
Rückstände VP an Rührbehälterwand	10 l	50 ml	$\pm 1,4 \text{ ppm}$
Dosierung der Versuchsstoffe	8,5 l	20 ml	$\pm 0,07 \%$
Venturi-Effekt trotz Förderungsende VP	1,5 l	80 ml	$\pm 1,52 \%$
fehlerhafte Pixel (Bildrauschen)	545303 Pixel	1000 Pixel	$\pm 0,05 \%$
Strukturveränderungen der Probe	58,63 mPa·s	1,52 mPa·s	$\pm 1,83 \%$
Lufteinschlüsse durch Homogenisieren	5 ml	0,1 ml	$\pm 0,58 \%$
Messungenauigkeit Rheometer	60,36 mPa·s	-	$\pm 0,14 \%$
ungenauer Erwartungswert	57,55 mPa·s	2,81 mPa·s	$\pm 1,41 \%$
Legende: VP - PSM-Vergleichsprodukt			
μ - Erwartungswert der Messdaten			
σ - Standardabweichung			
u_{rel} - relative Unsicherheit			

Zur besseren Vergleichbarkeit der Methoden in ihren Abweichungen untereinander ist aus der Unsicherheit, die mit der Gleichung (6.3) berechnet wurde, und mit Hilfe der Messwerte die relative Messunsicherheit zu bilden. Diese ist für jede Ursache einer zufälligen Abweichung zusammen mit dem Erwartungswert und der Standardabweichung als Berechnungsergebnis in Tabelle 6.2 aufgeführt. Sind für die Berechnung einzelner Abweichungen konkrete Messwerte erforderlich, wurde der Versuch B.170 herangezogen. Die mögliche Übertragung der Unsicherheiten von Versuch B.170 auf andere Versuche wird durch die gemeinsame

Versuchsbasis als zulässig eingeschätzt. Wiederholte Berechnungen der Unsicherheiten sind daher nicht notwendig. Für die Mengenabweichungen der einzelnen Komponenten wurde die angegebene Messunsicherheit der jeweiligen Messeinrichtung als plausibel bewertet und die daraus resultierende relative Unsicherheit ist angegeben.

Systematische Abweichungen werden nach [DIN96] in bekannte systematische Abweichungen und unbekannte systematische Abweichungen unterteilt. Aus der bekannten systematischen Messabweichung korreliert der Schätzwert der Abweichung eines Messergebnisses. Dieser wird als negative Korrektion mit dem Messwert direkt verrechnet. Die Ermittlung der negativen Korrektion erfolgt durch die erfassten Grenzen zwischen denen der wahre Messwert schwankt:

$$x_2 = -K = \frac{(a + b)}{2} \quad (6.4)$$

mit

x_2	Schätzwert
K	Korrektion
a	untere Grenze
b	obere Grenze

Die unbekannte systematische Abweichung hingegen kann durch die Unsicherheit der Messung ausgedrückt werden. Diese Unsicherheit wird dem Messwert beigefügt und berechnet sich auch durch die Grenzen des wahren Messwertes und der Varianz für die Annahme einer gleichmäßigen Rechteckverteilung der Messwerte [DIN96]:

$$u = \frac{(b - a)}{\sqrt{12}} = \frac{\Delta g}{\sqrt{12}} \quad (6.5)$$

mit

u	Unsicherheit des Schätzwertes
a	untere Grenze
b	obere Grenze
Δg	Differenz der Grenzen

Die Unsicherheit der Ursachen wird ebenfalls als relative Unsicherheit berechnet, damit die einzelnen Abweichungen miteinander vergleichend bewertet werden können. Diese relative Unsicherheit ist zusammen mit dem Erwartungswert und der Differenz der Grenzen bezogen auf deren Ursachen in Tabelle 6.3 angegeben.

Tabelle 6.3: Werte der betrachteten, systematischen Abweichungen am Beispiel von B.170.

Ursache	μ	Δg	u_{rel}
Lichtreflexionen an Versuchsanlagenkomponenten	2000 lm	5 lm	$\pm 0,07 \%$
Detailltiefe des Entnahmevolument der EPM	8700 ml	0,019 ml	$\pm 0,63 \text{ ppm}$
betrachtetes Volumen der Versuchsflüssigkeit bei der EPM	10 l	1,3 l	$\pm 3,75 \%$
Abzug der Referenzaufnahme	255	105	$\pm 11,89 \%$
ungenaueres Π_{opt}	0,180	0,035	$\pm 5,61 \%$
Detailltiefe des Entnahmevolument der konventionellen Methode	120 ml	20 ml	$\pm 4,81 \%$
betrachtetes Volumen der Versuchsflüssigkeit bei der konventionellen Methode	10 l	9,88 l	$\pm 28,52 \%$
Legende: μ - Erwartungswert Δg - Differenz der Grenzen des wahren Wertes u_{rel} - relative Unsicherheit			

Um aus den berechneten, relativen Unsicherheiten die Genauigkeit der Methode ablesen zu können, sind die resultierenden Unsicherheiten zu bilden. Die Berechnung erfolgt nach [DIN96] mit der Gleichung (6.6). Zu beachten ist, dass Unsicherheiten aus zufälligen und systematischen Abweichungen getrennt voneinander zusammengerechnet werden. Für jede Methode sind dabei die aus den ersten beiden Teilprozessen der Versuchsdurchführung ermittelten zufälligen Abweichungen miteinbezogen. Die resultierenden, relativen Unsicherheiten sind kategorisiert nach den beiden Methoden und der zufälligen wie der systematischen Abweichungen in Tabelle 6.4 angegeben.

$$u_{ges} = \sqrt{(u_1^2 + u_2^2)} \quad (6.6)$$

mit

u_{ges} gesamte Unsicherheit

u_1 Unsicherheit der ersten zufälligen Abweichung

u_2 Unsicherheit der zweiten zufälligen Abweichung

Tabelle 6.4: Genauigkeiten der Methoden anhand der Unsicherheiten resultierend aus zufälligen und systematischen Abweichungen.

relative Unsicherheit	EPM	konventionelle Methode
zufällige Abweichungen	$\pm 1,65 \%$	$\pm 2,91 \%$
systematische Abweichungen	$\pm 13,67 \%$	$\pm 28,92 \%$

In Tabelle 6.4 ist zu erkennen, dass die zufälligen Abweichungen der Methoden im Verhältnis zu den systematischen Abweichungen klein sind. Die zufälligen Abweichungen sind häufig abgeschätzt, da Messwerte der jeweiligen Ursache für die Plausibilitätsprüfung der EPM nicht zur Verfügung stehen. Der Erwartungswert und die Standardabweichung solcher Ursachen werden demnach sinnvoll gewählt. Bei diesen Fällen ist die Übertragung der Rechenvorschrift für systematische Abweichungen als zulässig bewertet. Zum Zweck der Methodeneinschätzung sind die vorliegenden Ergebnisse der resultierenden relativen Unsicherheit daher genügend aussagekräftig. D. h. die plausiblen, kleinen Werte der relativen Unsicherheit der EPM ($\pm 1,65 \%$) und der konventionelle Methode ($\pm 2,91 \%$) erlauben eine Genauigkeitsabschätzung der Methoden über die systematischen Abweichungen.

Da im vorliegenden Untersuchungsfall die Methoden vergleichend zueinander zu betrachten sind, ist eine relative Auswertung sinnvoll. Hier werden die relativen Verhältnisse von Messgrößen herangezogen, um die Fehlerbetrachtung durchzuführen. Absolute Messwerte sind demnach nicht zwingend erforderlich, um die relative Genauigkeit der Methoden zueinander ermitteln zu können.

Bei dem Vergleich der Methoden in ihren systematischen Abweichungen besitzt die EPM eine größere Genauigkeit als die durchgeführte konventionelle Methode. Die Fehlerbetrachtung der EPM hat eine systematische Abweichung von $\pm 13,67 \%$ ergeben. Diese liefert im Verhältnis zur Genauigkeit der konventionellen Methode mit $\pm 28,92 \%$ doppelt so genaue Ergebnisse.

Für eine zweckmäßigere Vergleichsmethode kann die gewählte rheologische Untersuchung der Proben verbessert werden, indem mehr Proben genommen und ausgewertet werden. D. h. je mehr Proben genommen werden, desto genauer ist das Untersuchungsergebnis der konventionellen Methode und das Ergebnis der beiden Methoden zeigt mehr Übereinstimmungen als bei der derzeitigen Durchführung. Es ist jedoch zu beachten, dass durch den unterschiedlichen Untersuchungsraum ein absoluter Vergleich der Messergebnisse nicht durchgeführt werden kann.

Obwohl der Vergleich der Genauigkeiten der beiden Methoden die EPM gegenüber der konventionellen Methode als genauer bewertet, ist eine systematische Abweichung von $\pm 13,67\%$ für eine Prüfmethode gegenüber einer zufälligen Abweichung von $\pm 1,65\%$ hoch. Welche Maßnahmen für eine Prüfeinrichtung der EPM getroffen werden können, um die Genauigkeit der Methode zu verbessern und die Anwendungsvielfalt zu erhöhen, ist im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

6.3 Mögliche Prüfeinrichtung

Für eine praxistaugliche Prüfung durch die EPM ist es notwendig, die aufgebaute Versuchsanlage zweckmäßig zu einer handhabbaren Prüfeinrichtung zu komprimieren. Ein kompaktes und damit mobiles Endgerät sollte für die Anwendung der EPM zur Verfügung stehen. Zur Funktionalitätserweiterung der EPM sind zusätzliche Prüfmöglichkeiten angedacht, die durch die Prüfeinrichtung ebenfalls untersucht werden können. Zusammen mit der Beschreibung des Aufbaus der Prüfeinrichtung werden nachfolgend die Vorteile der Prüfeinrichtung gegenüber der Versuchsanlage aufgeführt und die Funktionalitätserweiterungen dargestellt.

6.3.1 Mobiles Endgerät

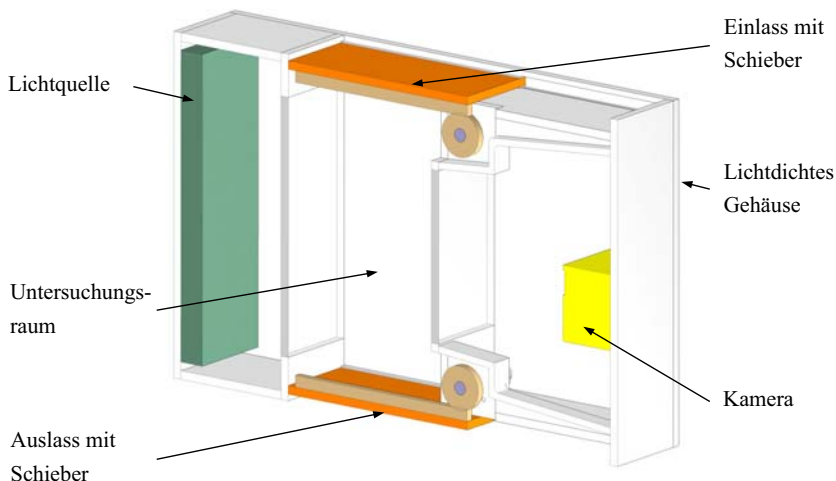


Bild 6.7: CAD-Modell für die Prüfeinrichtung der EPM.

Der grundsätzliche Aufbau der Prüfeinrichtung richtet sich nach der Anordnung der Komponenten im Versuch. Der Untersuchungsraum, in dem die Versuchsflüssigkeit später

vorliegen wird, befindet sich zwischen der Lichtquelle und der Kamera (siehe Bild 6.7). Die flächige Lichtquelle ist direkt in die Kamera gerichtet. Sie ist abgeschirmt und damit diffus ausgeführt, um die Gleichmäßigkeit der Lichtintensität zu gewährleisten. Die Bildaufnahme der Kamera berücksichtigt den gesamten Untersuchungsraum und ermöglicht eine Untersuchung von 100 % der vorliegenden Versuchsflüssigkeit. Ein ausreichender Abstand zwischen der Kamera und dem Untersuchungsraum ist vorgesehen, damit die optischen Verzerrungen klein gehalten werden und keine Randbereiche der Versuchsflüssigkeit mit geringeren Schichtdicken auftreten. Hierzu ist ebenfalls der Untersuchungsraum mit einer trapezförmigen Grundfläche ausgeführt. Gegenüber dem Auffangtank in der Versuchsanlage besitzt der Untersuchungsraum der Prüfeinrichtung eine geringere Schichtdicke. Dies sorgt für eine genügend hohe Lichtintensität bei trüben Versuchsflüssigkeiten zur Erstellung der Bildaufnahmen. Die direkte Auswertung und unmittelbare Ergebnisanzeige am Gerät dient einer unkomplizierten und schnellen Prüfung von Pflanzenschutzsystemen.

Die Vorteile des EPM-Gerätes gegenüber der Versuchsanlage sind im Wesentlichen die identischen Kamerabedingungen bei jeder Bildaufnahme. Denn durch den Aufbau der Kamera in der Versuchsanlage kann nicht gewährleistet werden, dass die Positionierung der Kamera bei jeder Versuchsdurchführung identisch ist, während im EPM-Gerät eine festinstallierte Kamera im lichtdichten Gehäuse für dieselben Umgebungsbedingungen sorgt. Dadurch wird eine Genauigkeitserhöhung der EPM erreicht. Durch die vollständige Unterdrückung der Fremdlichteinflüsse liegen bei den Aufnahmen beispielsweise keine Reflexionen mehr vor. Es sind keine Referenzaufnahmen für die Versuche mehr notwendig, wodurch die Fehlerquellen reduziert sind. Ein direkter Vergleich der Versuche ist dann noch besser möglich.

Nachteilig zu nennen ist, dass durch die kompakte Bauweise der Untersuchungsraum gegenüber der Versuchsanlage kleiner ist und damit weniger Versuchsflüssigkeit zeitgleich untersucht werden kann. Wird das Gerät im Brühebehälter einer Pflanzenschutzspritze eingesetzt, erfolgt die Untersuchung wie bei der derzeitigen, konventionellen Prüfung nur stichprobenartig.

6.3.2 Funktionserweiterungen der EPM

Gegeben durch den Untersuchungszusammenhang wurde die EPM entwickelt, um die Mischqualität einer Vormischung aus PSM und Wasser zu überprüfen. Dies wurde durch die Nutzung des PSM-Vergleichsproduktes und des fluoreszierenden Tracers ermöglicht. In der praktischen Anwendung sind jedoch weitere Stellen im Pflanzenschutzsystem als kritische Einspeisepunkte zu sehen. Beispielsweise muss die Möglichkeit gegeben sein, auch die düsennahe Direkteinspeisung in ihrer Mischqualität zu untersuchen. Daher sehen die sinnvoll erweiterten Untersuchungsmöglichkeiten, die eine ganzheitliche EPM abdeckt, wie folgt aus:

- Untersuchung der Mischqualität an verschiedenen Stellen des Pflanzenschutzsystems,
- Objekterkennung zur Ermittlung von Texturen der untersuchten Flüssigkeit,
- Untersuchungen der Querverteilungsgenauigkeit und
- Konzentrationsmessungen der vorliegenden Flüssigkeiten.

Für die zusätzlichen Funktionalitätserweiterungen zur Prüfung im Pflanzenschutzsystem sind auch weitere Gerätekomponenten oder Auswertungsverfahren erforderlich. So benötigt die Untersuchung der Mischqualität an verschiedenen Stellen die Möglichkeit, die Prüfeinrichtung an der betrachteten Stelle zu installieren. Hierzu ist eine Anpassung des Untersuchungsraumes vorzusehen. Der Untersuchungsraum ist als Wechselsystem auszuführen. Dieser ist beispielsweise in das Leitungssystem des Flüssigkeitssystems zu integrieren. Anschlussstellen für die Leitungen sind am Einlass und Auslass vorhanden. Die Einlass- und Auslassschieber werden zurückgezogen. Für den normalen Untersuchungsfall dienen diese Schieber zum einen als Abdichtung des Untersuchungsraumes gegenüber dem Ausfließen der Versuchsflüssigkeit. Zum anderen bieten sie die Abdichtung gegenüber Fremddichteinwirkungen. Zu beachten ist, dass die Abdichtung gegenüber Fremddichteinflüssen in jedem Untersuchungsfall gewährleistet ist.

Die Objekterkennung zur Ermittlung von Texturen der Flüssigkeit erfordert eine Erweiterung des Auswertalgorithmus. Sinnvoll ist diese Erweiterung, um die Mischqualitäten detaillierter zu differenzieren. In Bild 6.8 sind beispielweise zwei Versuchsaufnahmen abgebildet, die eine annähernd gleiche Mischqualität aufweisen. Links ist eine Textur zusehen, deren Versuchsflüssigkeit eher eine Phase ausbildet, während rechts Anhäufungen des PSM-Vergleichsproduktes im Wasser nicht gelöst werden konnten. Je nach Einspeiseort, können sich die Texturen der Vermischung unterschiedlich auswirken. Liegen diese Mischqualitäten düsennah vor, sorgt die Phasenbildung (Bild 6.8 li.) beispielsweise dafür, dass zu Anfang der Applikation hohe Konzentrationen der Wirkstoffe appliziert werden, während zum Ende der Applikation sehr geringe Konzentrationen der Wirkstoffe vorhanden sind. Die rechte abgebildete Textur kann dazu führen, dass Pflanzen mit Wirkstoffen überversorgt werden, während ihre Nachbarn wenig Wirkstoff erhalten. Über die gesamte Ausbringdauer entstehen in der applizierten Brühe immer wieder Konzentrationsmaxima und –minima der Wirkstoffe. Die Chance bei dieser Textur besteht jedoch, dass der Einspeisestelle nachgelagerte, erzeugte Turbulenzen in Leitungen und der Düse zur Homogenisierung der Mischung beitragen. Dann kommt es zu weniger Wirkstoffschwankungen als bei der Textur mit einer Phasenbildung.

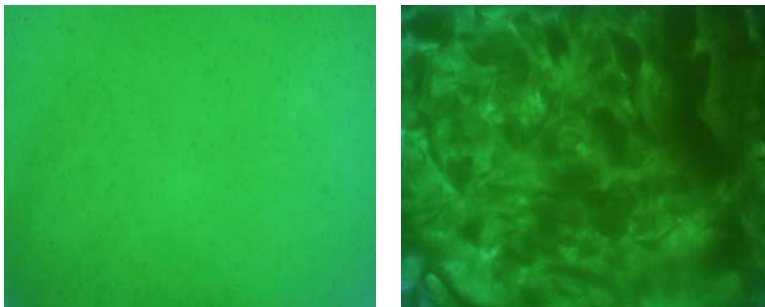


Bild 6.8: Versuchsaufnahmen Vergleich zwei Versuche annähernd gleicher Mischqualität. Versuch B.240 mit $p = \pm 14,8 \%$ (li.); Versuch A.110 mit $p = \pm 14,6 \%$ (re.).

Die beiden Versuchsaufnahmen besitzen nach der EPM annähernd den gleichen Mischungszustand. Für die Prüfung von Pflanzenschutzspritzen ist dieses Ergebnis der angewendeten EPM geeignet. Wird die EPM zur Unterstützung der Entwicklung von Pflanzenschutzsystemen eingesetzt, kann die Textur der Mischungen zusätzlich von Bedeutung sein. Je nach nachgelagertem System haben wie oben erläutert die Texturen andere Auswirkungen. Die Analyse dieser ist dementsprechend eine ergänzende Prüfmöglichkeit für die Einschätzung der Funktionsfähigkeiten der verschiedenen Varianten von Funktionsmustern in frühen Entwicklungsphasen. Da Texturen im Histogramm der Bilder nicht erkennbar sind (vgl. Kapitel 2.2.3, Bild 2.18), sollte hier die Objekterkennung durch die EPM zusätzlich abgedeckt werden.

Üblicherweise werden Pflanzenschutzsysteme auch auf ihre Querverteilung im Gestänge getestet. Diese Prüfungen werden von den Zulassungsstellen ebenfalls mit fluoreszierenden Tracern durchgeführt (siehe Kapitel 2.2.2). Hier wird die Messung der Fluoreszenz zur Auswertung genutzt. Dies erfolgt, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, durch einen Vergleich mit einer Referenzprobe, die eine definierte Tracer-Konzentration besitzt. Wird im Untersuchungsraum des EPM-Gerätes ein paralleler Raum für eine Referenzprobe vorgesehen und der Untersuchungsraum ist in mehrere Kammern unterteilt, können alle Proben aus dem Querverteilungstest zeitgleich eingefüllt werden. Liegt ein Auswertungsalgorithmus für diese Prüfung vor, kann eine direkte und vergleichende Auswertung des Querverteilungstestes durch die EPM erfolgen.

Ob durch definierte Tracer-Konzentrationen die Versuchsflüssigkeit auf ihre Konzentration untersucht werden kann, ist durch weitere nachfolgende Untersuchungen zu zeigen. Dies kann Anwendung finden, wenn eine Datenbank mit Konzentrationen der drei Versuchskomponenten in jeder möglichen Kombination vorliegt. Zu den Kombinationen ist ein Farbwert zu hinterlegen, der den Konzentrationen zugeordnet ist. Hier ist zu prüfen, ob die Nutzung eines anderen Farbraums sinnvoller ist.

Durch eine genaue Dosierung des Tracers, kann auf eine kalibrierfähige Farbe der Mischung zurückgeschlossen werden. Eine Konzentrationsaussage über die vorliegende Flüssigkeit wird anhand der Farbwerte möglich. Damit benötigt die Prüfeinrichtung keine Referenzprobe mehr und ist kalibrierfähig.

6.3.3 Ausblick über die nächsten Schritte zur Erweiterung der EPM

Im vorliegenden Untersuchungsfall ist die EPM funktionsfähig. Damit der Nutzungsbereich der Methode zusätzlich verbessert wird, können die vorgeschlagenen Funktionserweiterungen des EPM-Verfahrens nach weiteren Erprobungen durchgeführt werden. Ausblickend dargestellt sind dazu folgende Untersuchungen:

- Untersuchungen mit Versuchsflüssigkeiten, die Wirkstoffkonzentrationen von Brühen abbilden,
- Erprobungen und Auswertungsanpassungen zur Prüfung an verschiedenen Orten im Pflanzenschutzsystem,
- Aussagefähigkeit über die Konzentrationen in der Versuchsflüssigkeit,
- Plausibilitätsprüfung für Versuchsflüssigkeiten ohne Tracer,
- Prüfung von Möglichkeiten der Konzentrationsmessung bei realen PSM und
- Möglichkeitsprüfung über den Einsatz von anderen Kameratechniken.

Im vorliegenden Untersuchungsfall wurde bislang getestet, wie die Mischqualität einer simulierten Vormischung zwischen PSM und Wasser untersucht werden kann. Da die Mischqualität an verschiedenen Stellen in einem Pflanzenschutzsystem prüfbar sein soll, ist die Möglichkeit, eine durch die Versuchsstoffe simulierte Brühe auf ihre Mischqualität hin zu untersuchen, notwendig. D. h. ein wesentlich dünnerer Versuchsstoff ist durch die EPM auszuwerten. Entscheidend kann hier sein, dass die Trübung der Flüssigkeit abnimmt und dadurch die Lichtintensität in der Aufnahme wesentlich zunimmt. Zeitgleich sind die Konzentrationsabweichungen der Flüssigkeit bei benachbarten Pixeln geringer und evtl. schwerer zu identifizieren. Die zusätzliche Objekterkennung kann hier sinnvoll sein.

Außerdem ist für diese Zusammenhänge eine Auswertungsanpassung erforderlich. Eigenschaften der Versuchsflüssigkeiten und Anforderungen an ihre Zustände sind in die Auswertungsanpassungen mit einzubeziehen. Beispielsweise besitzen die unterschiedlichen Einspeiseorte im Pflanzenschutzsystem jeweils andere Anforderungen an die Mischungszustände. Außerdem kann der Algorithmus mit Hilfe einer Fourier-Transformation ausgearbeitet werden. Dies dient dazu, dass die Werte der Pixel alle in einer Matrix hinterlegt sind und zur Bildauswertung lediglich eine Matrizenrechnung notwendig ist. Während die Auswertung der einzelnen Pixel insgesamt eine Sekunde benötigt, kann die Auswertung mit Hilfe der Matrizenrechnung mit heutiger Standardrechenntechnik innerhalb von zehntel

Sekunden abgeschlossen werden. Die schnellere Berechnung der Bilddaten ermöglicht eine Erhöhung der Echtzeitfähigkeit der EPM.

Eine Erweiterung der EPM bietet die Aussagefähigkeit über die Konzentrationen in der Versuchsflüssigkeit. Eine Erprobung der Konzentrationsmessung ist noch durchzuführen. Ebenfalls sind die Möglichkeiten zur Mischqualitätsprüfung ohne Tracer sowie die Konzentrationsmessung im Umgang mit realen PSM zu erproben. Dazu kann insbesondere bei der Erprobung ohne Tracer die Lichtquelle angepasst werden und ein geeignetes Lichtspektrum für den Untersuchungsfall gewählt werden. Bei diesen Einsatzmöglichkeiten bietet die Prüfmethode Vereinfachungen im Prüfverfahren sowie ein erweitertes Einsatzgebiet.

Bei der durchgeführten Prüfung der Plausibilität der EPM in dieser Arbeit, wurde eine handelsübliche Spiegelreflexkamera verwendet. Diese ist für den Untersuchungsfall gut geeignet. Eine Möglichkeit das Anwendungsspektrum zu erweitern kann der Einsatz einer 3D Time of Flight-Kamera sein.

Mit der Prüfeinrichtung der EPM ist eine für die Pflanzenschutzspritzenprüfung neue Methode einsetzbar. Wie in Kapitel 1 beschrieben, wurde mit der EPM ein hilfreiches Werkzeug für die Funktionsmusterprüfung entwickelt. Die Methode kann systemübergreifend eingesetzt werden. D. h. sie prüft konventionelle Pflanzenschutzspritzen aber auch DES. Der optische Untersuchungsansatz der EPM ermöglicht eine andere Güte in der Prüfung von Pflanzenschutztechnik als die konventionellen Prüfverfahren. Die EPM kann an beliebigen Orten auch außerhalb von Erprobungszentren im Feldeinsatz und echtzeitfähig Anwendung finden und gibt die Möglichkeit einer genauen Analyse der Prozessfähigkeit von Pflanzenschutzsystemen. Dadurch trägt sie zu einer verbesserten Entwicklung von DES bei. Ihre Verwendung hilft einen reduzierten Einsatz von PSM zu gewährleisten.

7 Zusammenfassung

Direkteinspeisungssysteme (DES) werden in der Pflanzenschutztechnik als bestmögliche Lösungen zur Applikation von Pflanzenschutzmitteln angesehen. Bislang konnten sich diese jedoch nicht gegenüber den konventionellen Pflanzenschutzsystemen auf dem Markt etablieren. Dies kann unter anderem auf die Schwächen von DES im Umgang mit den variantenreichen Pflanzenschutzmitteln (PSM) und deren zahlreiche Kombinationenmöglichkeiten zurückgeführt werden. Um entwickelte Systeme im Umgang mit PSM zu erproben und damit den Entwicklungszyklus zu beschleunigen, fehlt es neben der computerbasierten Simulation an einfachen und schnellen Prüfmöglichkeiten.

Prüfungen der Pflanzenschutzspritztechnik werden von den zuständigen Prüfstellen durchgeführt. Dazu werden überwiegend standardisierte Prüfverfahren verwendet. Diese erfordern aufwendige Messungen und komplexe Messtechnik. Zur Vereinfachung der Prüfungen wurde in Analogie zu schnellen Sichtprüfungsverfahren der industriellen Qualitätssicherung die Echtzeitfähige Prüfmethode (EPM) entwickelt.

Für die Versuchsdurchführung zur Erzeugung von verschiedenen Mischqualitäten konnten Versuchsstoffe gefunden werden, die eine alternative Versuchsflüssigkeit zur Mischung aus PSM und Wasser abbilden. Eine Mischung aus dem Verdickungsmittel Xanthan und Wasser bildet das PSM-Vergleichsprodukt, welches in den Versuchen das PSM ersetzt. Hiermit können Produkte verschiedener Viskosität auch mit einem eher schwierigen Mischverhalten hergestellt werden. Als Markierungsstoff wurde der fluoreszierende Farbstoff BSF eingesetzt. Dieser ist dem PSM-Vergleichsprodukt in geringen Mengen zugesetzt.

In die Versuchsanlage ist die Einrichtung der EPM integriert. Hier sind eine UV-Lichtquelle und eine Kamera installiert, um die Bildaufnahmen der einzelnen Versuche zu tätigen. Diese werden genutzt, um mit dem entwickelten Auswertungsalgorithmus der EPM eine Aussage über die Mischqualität des Versuches zu erhalten. Des Weiteren wurden anschließend Proben entnommen, um die Mischqualität mit Hilfe einer konventionellen Prüfmethode zu bestätigen.

Bei dem Vergleich der Ergebnisse aus der EPM und der konventionellen Probenuntersuchung ist auffallend, dass diese für die Methoden in einigen Fällen gut übereinstimmen, während sie in anderen voneinander abweichen. Die wesentliche Ursache dafür ist, dass das betrachtete Volumen der Versuchsflüssigkeit und die Detailtiefe des Untersuchungsraumes in beiden Methoden sehr verschieden sind, sodass jede Methode andere Volumen der Versuchsflüssigkeit homogenisiert. Ein absoluter Vergleich zwischen den Ergebnissen der beiden Methoden ist daher nicht sinnvoll.

Durch die Abschätzung der relativen Genauigkeit konnte gezeigt werden, dass die EPM gegenüber der konventionellen Viskositätsmessung sehr gut arbeitet. Hergeleitet wurden die

Methodengenauigkeiten durch eine Fehlerbetrachtung der gesamten Versuchsdurchführung. Im Untersuchungszusammenhang der vorliegenden Arbeit liefert die EPM aufgrund ihrer Detailtiefe und dem betrachteten Volumen der Untersuchung eine Aussage über die Mischungsqualität mit doppelter Genauigkeit der konventionellen Methode.

Beide Methoden können in ihrer Genauigkeit verbessert werden. Die konventionelle Methode steigert ihre Genauigkeit durch eine Erhöhung der Probenanzahl. Dadurch vergrößert sich das entnommene Volumen der Versuchsflüssigkeit und die relative Bewertung der Mischqualität nimmt mit mehr absoluten Werten zu. Die EPM kann durch die Entwicklung einer Prüfeinrichtung, die auf sie abgestimmt ist, optimiert werden. In dieser Einrichtung wird ebenfalls das betrachtete Volumen der Versuchsflüssigkeit erhöht und die negativen Umgebungseinflüsse auf das Methodenergebnis werden reduziert. Welche Maßnahmen zur Weiterentwicklung der EPM noch durchgeführt werden können, zeigt der Ausblick über die weiteren Prüfmöglichkeiten der EPM.

Die EPM ermöglicht eine neue Form der qualitativen Prüfung von Pflanzenschutzsystemen. Sie arbeitet ortsunabhängig, sowohl im System selbst als auch bezogen auf den Prüfungsort. Mit ihr wird eine flexible und schnelle Prüfung von Pflanzenschutzsystemen erreicht.

8 Literaturverzeichnis

- [Bal07] Baltes, Werner: *Lebensmittelchemie. Mit 91 Tabelle*. 6., vollst. überarb. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 2007, S. 178-180.
- [Bey12] Beyerer, Jürgen; Puente León, Fernando; Frese, Christian: *Automatische Sichtprüfung. Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, S. 195-244, S.271-431.
- [Boc14] Bockholt, Karl: *Tankmischungen: nur sinnvoll mischen*. In: *dlz - agrarmagazin* 2014 (Nr. 3), S. 42–46.
- [Bör09] Börner, Horst: *Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*. 8., neu bearb. und aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009, S. 457-481, S. 493-497, S. 551-555.
- [Bre93] Breuckmann, Bernd: *Bildverarbeitung und optische Messtechnik in der industriellen Praxis. Grundlagen der 3D-Messtechnik, Farbbildanalyse, Holografie und Interferometrie mit zahlreichen praktischen Applikationen*. München: Franzis, 1993, S. 19 f., S. 22-27, S. 46 f., S. 55-61, S. 213-219.
- [BS96] British Standard. BS 6356-9: *Spraying equipment for crop protection - Part 9. Specification for systems for closed transfer of liquid formulations*. 1996, S. 5.
- [Bun18a] Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit: *Liste der zugelassenen Pflanzenschutzmittel in Deutschland. mit Informationen über beendete Zulassungen*. URL: http://www.bvl.bund.de/DE/04_Pflanzenschutzmittel/01_Aufgaben/02_Zulassung_PSM/01_ZugelPSM/psm_ZugelPSM_node.html. Zugriff am: 04.09.2018, S. 4-80, S. 92.
- [Bun18b] Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit: *Pflanzenschutzmittel-Verzeichnis 2018. Teil 1*. URL: http://www.bvl.bund.de/DE/04_Pflanzenschutzmittel/01_Aufgaben/02_Zulassung_PSM/01_ZugelPSM/psm_ZugelPSM_node.html. Zugriff am: 04.09.2018, S. 18-424.
- [Bur09] Burger, Wilhelm; Burge, Mark James: *Principles of digital image processing*. Guildford, Surrey: Springer, 2009-2012, S. 37-54, S. 186-231.
- [Dai19] Dai, Xiang; Xu, Youlin; Zheng, Jiaqiang; Song, Haichao: *Analysis of the variability of pesticide concentration downstream of inline mixers for direct nozzle injection systems*. In: *Biosystems Engineering 180* (2019) , S. 59–69.

-
- [Dam16] Dammann: *Projekt D-I-S PSM. Gemeinschaftsprojekt des Julius Kühn-Institut und der HERBERT DAMMANN GmbH*. URL: https://www.dammann-technik.de/wp-content/uploads/2018/08/DAMMANN-technik_Prospekt_Projekt_DIS_PSM_2.pdf. Zugriff am: 13.12.2018.
- [DIN95] Deutsches Institut für Normung. DIN 1319-1: *Grundlagen der Meßtechnik. Teil 1: Grundbegriffe*. Januar 1995.
- [DIN96] Deutsches Institut für Normung. DIN 1319-3: *Grundlagen der Meßtechnik. Teil 3: Auswertungen von Messungen einer einzelnen Meßgröße. Meßunsicherheit*. Mai 1996.
- [Ebn10] Ebner, Marc: *Color constancy*. Chichester: John Wiley, 2010, S. 87-101.
- [Ems17] Emsbach, Maria Regina: *Gefahrstoffe, Pflanzenschutz, Umweltschutz*. 2., völlig neu bearbeitete Auflage. Stuttgart: Deutscher Apotheker Verlag, 2017, S. 344-358, S. 366-472.
- [Esc93] Escher, Felix; Weipert, Dorian: *Rheologie der Lebensmittel*. Hamburg: Behr, 1993, S. 68-85, S. 178-183, S. 198-213.
- [Gon14] Gonzalez, Rafael C.; Woods, Richard E.: *Digital image processing*. Tercera edición. New Delhi: Dorling Kindersley, 2014, S. 35-103, S. 394-460.
- [Her17] Herbst, Andreas: *Elektronische Systeme bei Pflanzenschutzgeräten*. In: *Jahrbuch Agrartechnik 2016, Band 28*. 28, 2016 2017 . URL: https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/receive/dbbs_mods_00064178, S. 1–8.
- [Hlo07] Hlobeñ, Peter: *Study on the response time of direct injection systems for variable rate application of herbicides*. Bonn, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Dissertation. 20. Juli 2007.
- [ISO04] International Standard. ISO 22368-3: *Crop protection equipment - Test methods for the evaluation of cleaning systems - Part 3: Internal cleaning of tank*. März 2004, S. 1-5.
- [ISO08] International Standard. ISO 21278-1: *Equipment for crop protection - Induction Hoppers - Part 1: Test methods*. November 2008, S. 1- 12.
- [ISO17a] International Standard. ISO 5682-2: *Equipment for crop protection - Spraying equipment - Part 2: Test methods to assess the horizontal transverse distribution for hydraulic sprayers*. Mai 2017, S. 1-6.
- [ISO17b] International Standard. ISO 5682-3: *Equipment for crop protection - Spraying equipment - Part 3: Test method to assess the performance of volume/ area adjustment systems*. Mai 2017, S. 1-4.

-
- [Jai95] Jain, Ramesh; Kasturi, Rangachar; Schunck, Brian G.: *Machine vision*. New York: McGraw-Hill, op. 1995, S. 73-109, S. 112-137, S. 276-287.
- [Jul13a] Julius Kühn-Institut. Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz: *Richtlinie für die Prüfung von Pflanzenschutzgeräten. 1-1.0 Anforderungen an Pflanzenschutzgeräte*. Braunschweig, April 2013.
- [Jul13b] Julius Kühn-Institut. Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz: *Richtlinie für die Prüfung von Pflanzenschutzgeräten. 3-1.0 Merkmale für die Kontrolle von in Gebrauch befindlichen Pflanzenschutzgeräten*. Braunschweig, Februar 2013.
- [Jul13c] Julius Kühn-Institut. Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz: *Richtlinie für die Prüfung von Pflanzenschutzgeräten. 7-1.1 Richtlinie für die Rührwerksprüfung*. Braunschweig, April 2013.
- [Jul13d] Julius Kühn-Institut. Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz: *Richtlinie für die Prüfung von Pflanzenschutzgeräten. Messung der direkten Abdrift beim Ausbringen von flüssigen Pflanzenschutzmitteln im Freiland*. Braunschweig, April 2013.
- [Kre14] Krebs, Mathias 2014: *Neue Ansätze zur Lösung der Probleme mit der Direkteinspeisung von Pflanzenschutzmitteln*. 59. Deutsche Pflanzenschutztagung: Vortrag. Freiburg, 23. - 26. September 2014.
- [Kre15] Krebs, Mathias; Rautmann, Dirk; Nordmeyer, Henning; Wegener, Jans Karl: *Entwicklung eines Direkteinspeisungssystems ohne Verzögerungszeiten zur Pflanzenschutzmittelapplikation*. In: *Landtechnik - Agricultural Engineering 2015* (70 (6)), S. 238–253.
- [Lei13] Leithold, Hermann: *Einsatz von Sensoren im Pflanzenschutz*. In: *LOP 2013* (Nr. 6), S. 39–44.
- [Lüb13] Lübke, Eva: *Farbempfindung, Farbbeschreibung und Farbmessung. Eine Formel für die Farbsättigung*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, S. 177-193.
- [Mar18] Marggraf, Ulla; Frerichs, Ludger: *Online-Prüfung der Mischqualität bei Direkteinspeisung. Direktes Prüfverfahren für Pflanzenschutzspritzen*. In: VDI-MEG (Hrsg.): *Land. Technik 2018 : Das Forum für agrartechnische Innovationen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2018, S. 59–66.
- [Neu05] Neumann, Burkhard: *Bildverarbeitung für Einsteiger. Programmeispiele mit Mathcad*. Berlin: Springer, 2005, S. 69-89.
- [Paw16] Pawelzik, Bernd: *Pflanzenschutztechnik: Sensorik nimmt dem Landwirt mehr und mehr Entscheidungen ab*. In: *Eilbote*. 64 2016 (Nr. 11), S. 7–9.

-
- [Pei92] Peisl, Sebastian; Estler, Manfred: *Direkteinspeisung von Pflanzenschutzmitteln. Ein Systemvergleich*. In: *Landtechnik - Agricultural Engineering*. 47. Jahrg. 1992 (3-92), S. 116–117.
- [Rav18] Raven Industries: *Sidekick Pro. Direct Injection*. 2018. URL: <https://ravenprecision.com/products/application-controls/sidekick-pro-direct-injection>. Zugriff am: 20.12.2018.
- [Ric96] Richter, Klaus: *Computergrafik und Farbmatrik. Farbsysteme, PostScript, geräteunabhängige CIE-Farben*. Berlin: VDE-Verlag, 1996, S. 18-22.
- [Roß16] Roßberg, Dietmar: *Erhebungen zur Anwendung von Pflanzenschutzmitteln im Ackerbau*. In: *Journal für Kulturpflanzen*. 68(2) 2016 . Zugriff am: 03.09.2018, S. 25–37.
- [Sch83] Schmidt, Manfred: *Direkteinspeisung von flüssigen Pflanzenbehandlungsmitteln*. Berlin, Technische Universität Berlin, Institut für Maschinenkonstruktion, Bereich Landtechnik und Baumaschinen, Forschungsbericht Agrartechnik; Dissertation. 1983.
- [Sök04] Sökefeld, M.; Hloben, P.; Schulze Lammers, P.: *Möglichkeiten und Grenzen der Direkteinspeisung von Pflanzenschutzmitteln zur teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle*. In: *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 2004 (Sonderheft XIX).
- [VDI93] VDI 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Mai 1993.
- [Von07] Vondricka, Jiri: *Study on the Process of Direct Nozzle Injection for Real-Time Site-Specific Pesticide Application*. Bonn, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Institut für Landtechnik, Dissertation. November 2007.
- [Wal11] Walgenbach, Martin; Dörpmund, Malte: *Eine ewige Vision? Direkteinspeisung bei Pflanzenschutzspritzen*. In: *Profi special* Februar 2011 (Nr. 02), S. 24–27.
- [Wal14] Walgenbach, Martin: *Aufbau und Untersuchung eines Versuchsträgers zur Direkteinspeisung an der Düse*. Bonn, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Institut für Landtechnik, Dissertation. 04. Februar 2014.
- [Weg16] Wegener, Jens Karl: *Neues aus der Pflanzenschutztechnik*. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): *Jahrbuch Agrartechnik 2015*. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeug, 2016 (27), S. 1–8.

Anhang






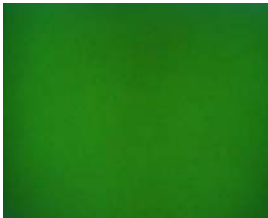

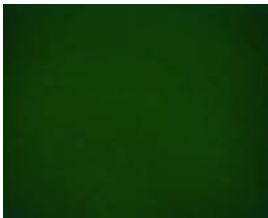
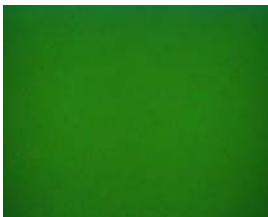
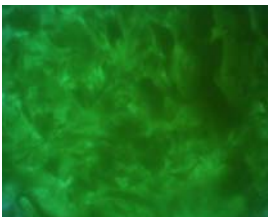
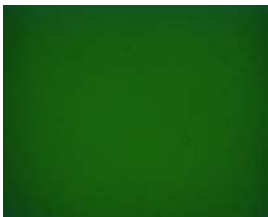
Tabelle A.1: Auswertungsergebnisse der EPM.













Versuch	R	G	B	Qualitätskriterium II	Mischqualitätsabweichung p
A.010	40	62	33	0,173	0 %
A.020	40	65	41	0,187	± 1 %
A.030	34	51	29	0,145	0 %
A.040	42	61	38	0,180	0 %
A.050	34	54	33	0,154	0 %
A.060	35	52	35	0,156	0 %
A.070	34	49	37	0,153	0 %
A.080	Versuch abgebrochen – keine Ergebnisse vorhanden				
A.090	62	36	26	0,158	0 %
A.100	36	52	40	0,163	0 %
A.110	43	108	69	0,284	± 14,6 %
A.120	51	51	41	0,183	± 0,4 %
B.010	62	73	47	0,234	± 7,6 %
B.020	61	76	53	0,244	± 7 %
B.030	10	76	52	0,176	0 %
B.040	74	70	48	0,247	± 9,4 %
B.050	78	73	40	0,246	± 9,2 %
B.060	71	78	118	0,345	± 23,1 %


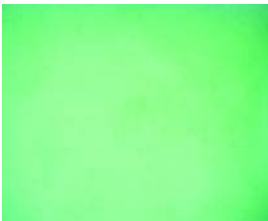

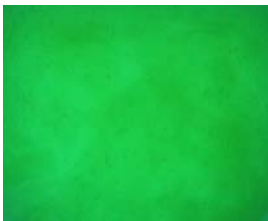




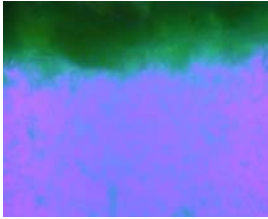
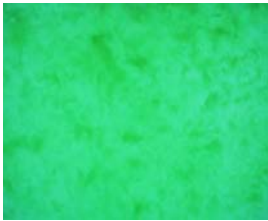


Versuch	R	G	B	Qualitätskriterium II	Mischqualitätsabweichung p
B.070	70	65	67	0,260	± 11,2 %
B.080	71	70	73	0,276	± 6,4 %
B.090	70	66	65	0,259	± 11,1 %
B.100	64	60	59	0,235	± 7,7 %
B.110	51	62	38	0,193	± 1,8 %
B.120	60	70	39	0,217	± 5,2 %
B.130	62	68	37	0,214	± 4,8 %
B.140	keine Auswertung möglich – Versuchsaufnahme fehlerhaft				
B.150	74	71	40	0,238	± 8,1 %
B.160	70	70	48	0,242	± 8,7 %
B.170	66	59	51	0,226	± 6,4 %
B.180	75	64	41	0,231	± 7,1 %
B.190	72	63	41	0,226	± 6,4 %
B.200	71	67	41	0,230	± 7 %
B.210	153	107	52	0,404	± 31,4 %
B.220	84	63	80	0,293	± 15,8 %
B.230	42	60	63	0,212	± 4,5 %
B.240	74	74	74	0,286	± 14,8 %
B.250	70	73	66	0,269	± 12,5 %
B.260	50	81	74	0,264	± 11,8 %

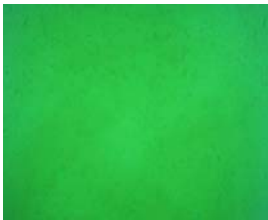





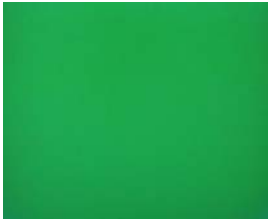





Versuch	R	G	B	Qualitätskriterium II	Mischqualitätsabweichung p
B.270	71	40	76	0,241	± 8,5 %
B.280	68	43	75	0,239	± 8,3 %
C.010	74	72	43	0,243	± 8,8 %
C.020	76	73	46	0,251	± 9,9 %
C.030	76	48	30	0,197	± 2,4 %
C.040	83	48	30	0,207	± 3,8 %
C.050	84	54	29	0,215	± 4,9 %
C.060	95	56	34	0,239	± 8,3 %
C.070	86	54	32	0,221	± 5,7 %
C.080	47	49	59	0,199	± 2,6 %
C.090	65	50	146	0,339	± 22,3 %
C.100	80	65	55	0,258	± 10,9 %
D.010	65	47	53	0,212	± 4,5 %
D.020	69	47	51	0,214	± 4,8 %
D.030	71	49	51	0,220	± 5,6 %
D.040	70	51	60	0,233	± 5,3 %

Tabelle A.2: Ausschnitte der Originalaufnahmen der Versuche.

A.010 	A.020 	A.030 
A.040 	A.050 	A.060 
A.070 	A.080 Versuch abgebrochen - keine Versuchsaufnahme vorhanden	A.090 
A.100 	A.110 	A.120 

B.010 	B.020 	B.030 
B.040 	B.050 	B.060 
B.070 	B.080 	B.090 
B.100 	B.110 	B.120 

B.130 	B.140 	B.150 
B.160 	B.170 	B.180 
B.190 	B.200 	B.210 
B.220 	B.230 	B.240 

B.250 	B.260 	B.270 
B.280 	C.010 	C.020 
C.030 	C.040 	C.050 
C.060 	C.070 	C.080 







C.090	C.100	D.010
		
D.020	D.030	D.040
		

Tabelle A.3: Messdaten der Messung der dynamischen Viskosität zerlegt in Proben der Versuche.

Probennr.	A.061	A.062	A.063	A.064	A.065	A.066
η [mPa·s] (20°C, 100⁻¹)	266,2	262,0	296,5	277,9	270,5	283,1
Probennr.	A.101	A.102	A.103	A.104	A.105	A.106
η [mPa·s] (20°C, 100⁻¹)	270,6	288,9	268,0	279,9	287,0	287,9
Probennr.	A.111	A.112	A.113	A.114	A.115	A.116
η [mPa·s] (20°C, 100⁻¹)	14,7	17,0	23,3	17,9	62,7	16,5
Probennr.	A.121	A.122	A.123	A.124	A.125	A.126
η [mPa·s] (20°C, 100⁻¹)	28,2	28,2	28,0	28,3	27,9	28,0
Probennr.	B.011	B.012	B.013	B.014	B.015	B.016
η [mPa·s] (20°C, 100⁻¹)	55,4	66,4	52,6	39,2	40,7	60,7
Probennr.	B.021	B.022	B.023	B.024	B.025	B.026
η [mPa·s] (20°C, 100⁻¹)	65,2	62,3	72,8	38,8	433	41,9
Probennr.	B.061	B.062	B.063	B.064	B.065	B.066
η [mPa·s] (20°C, 100⁻¹)	59,36	70,67	84,17	28,84	29,87	63,75
Probennr.	B.081	B.082	B.083	B.084	B.085	B.086
η [mPa·s] (20°C, 100⁻¹)	66,9	72,4	71,1	29,4	27,55	40,4
Probennr.	B.111	B.112	B.113	B.114	B.115	
η [mPa·s] (20°C, 100⁻¹)	55,7	63,2	64,0	49,4	64,4	
Probennr.	B.151	B.152	B.153	B.154	B.155	
η [mPa·s] (20°C, 100⁻¹)	69,5	68,8	63,0	41,9	39,5	

Probennr.	B.171	B.172	B.173	B.174	B.175	B.176
η [mPa·s] (20°C, 100⁻¹)	63,6	52,3	56,7	61,3	67,8	60,6
Probennr.	B.181	B.182	B.183	B.184	B.185	B.186
η [mPa·s] (20°C, 100⁻¹)	64,9	72,9	68,1	44,1	55,4	45,1
Probennr.	B.211	B.212	B.213	B.214	B.215	B.216
η [mPa·s] (20°C, 100⁻¹)	16,8	26,6	29,4	22,4	11,8	45,3
Probennr.	B.221	B.222	B.223	B.224	B.225	B.226
η [mPa·s] (20°C, 100⁻¹)	80,17	154,9	55,82	29,27	28,52	31,39
Probennr.	B.231	B.232	B.233	B.234	B.235	B.236
η [mPa·s] (20°C, 100⁻¹)	61,3	55,8	56,4	57,7	57,3	53,7
Probennr.	C.011	C.012	C.013	C.014	C.015	C.016
η [mPa·s] (20°C, 100⁻¹)	60,9	46,4	53,2	44,7	40,8	55,2
Probennr.	C.051	C.052	C.053	C.054	C.055	C.056
η [mPa·s] (20°C, 25⁻¹)	19,9	19,7	17,5	18,4	13,8	16,2
Probennr.	C.061	C.062	C.063	C.064	C.065	C.066
η [mPa·s] (20°C, 25⁻¹)	19,3	12,3	16,1	17,2	17,1	18,8
Probennr.	C.091	C.092	C.093	C.094	C.095	C.096
η [mPa·s] (20°C, 25⁻¹)	23,9	18,5	13,1	11,4	41,3	12,6